Deutsches Reich

Reichsamt für Wetterdienst

Wissenschaftliche Abhandlungen
Band IV

Nr. 1

Untersuchung der Wärmeschutzwirkung von Gittern und Pflanzen

von

Auguste Büdel

Mit 1 Tafel

Berlin 1938

Julius Springer

Untersuchung der Wärmeschutzwirkung von Gittern und Pflanzen.

Inauguraldissertation

der naturwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

eingereicht am 1. Juni 1937
von
Auguste Büdel.

Berichterstatter: Geheimer Regierungsrat Professor Dr. A. S c h m a u ß .
Professor Dr. R. G e i g e r .

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Juni 1937.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Deutsches Reich

Reichsamt für Wetterdienst

Wissenschaftliche Abhandlungen
Band IV

Nr. 1

Untersuchung der Wärmeschutzwirkung von Gittern und Pflanzen

von

Auguste Büdel

Mit 1 Tafel

Berlin 1938

Julius Springer

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung 3

I. Überlegungen zur Schutzwirkung von Gittern 4
a) Änderung des Strahlungsanteils 4
b) Änderung des Leitungsanteils 6
c) Änderung des Konvektionsanteils 7

II. Versuchsanordnung 7
a) Windkanal 7
b) Frigorimeter 7
c) Hitzdrahtwindmesser 8

III. Grundlagen der Auswertung . . . 9
a) Der Wärmehaushalt der Frigorimeterkugel . . 9
b) Bestimmung der Absorptionszahl ε der Frigorimeterkugel 10
c) Bestimmung der Wärmeübergangszahl α . . . 11

IV. Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Windgeschwindigkeit 12
a) Engmaschige, kugelförmige Eisengitter . . . 12
b) Weitmaschige, kugelförmige Eisengitter . . . 13
c) Engmaschige, zylinderförmige Eisengitter . . 13
d) Stoffe 14

V. Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Maschenweite 14

VI. Abhängigkeit der Schutzwirkung vom Gitterabstand 14
a) Kugelförmige Gitter 14
b) Zylindrische Gitter 16
c) Versuch einer Erklärung der Vorgänge . . . 17

VII. Wärmeschutzwirkung von Pflanzen . 17

VIII. Schlußfolgerungen 19

Zusammenfassung 19

Anhang 20
a) Berechnung der effektiven Ausstrahlung eines vom Gitter umgebenen Körpers 20
Spezialfälle 22
Ausstrahlung im Freien 22
b) Bedeutung der Berücksichtigung des Strahlungsschutzes bei d. Berechnung d. Wärmeübergangszahl 22

Literaturverzeichnis 23

1 Tafel mit den Abbildungen 15–17

Aus dem Lehr- und Forschungsinstitut für Meteorologie an der Universität München.

Einleitung.

Ein Körper, der wärmer ist als seine Umgebung, gibt bekanntlich Wärme durch Leitung, Konvektion und Strahlung ab. Die Beziehung zwischen Windgeschwindigkeit und Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion wurde für verschiedene Körper schon mehrfach untersucht und formelmäßig dargestellt[1]).

Umgibt man den Körper mit einem Gitter, so wird die Wärmeabgabe des Körpers verändert. In vorliegender Arbeit wird in erster Linie der Einfluß der veränderten Konvektion auf die Wärmeabgabe untersucht. Zu diesem Zwecke wurde die Schutzwirkung von Gittern durch Abkühlungsmessungen bestimmt.

Die meisten Versuche wurden mit Metallgittern ausgeführt, da hierbei die Verhältnisse genau definierbar sind; Maschenweite, Drahtstärke und Gitterabstand können gemessen, die Strahlung kann – wie gezeigt wird – berechnet werden. Somit kann die Wärmeabgabe eines Versuchskörpers durch Leitung und Konvektion und ihre Änderung durch das Gitter bestimmt werden.

Die in vorliegender Arbeit verwendeten Abkürzungen sind im folgenden aufgeführt:

A	Heizstromstärke in Ampère,
a	Abstand des Gitters von der Körperoberfläche in mm,
α	Wärmeübergangszahl durch Leitung und Konvektion in mgcal/cm² min grad,
α_g	Wärmeübergangszahl des geschützten Körpers,
α_f	Wärmeübergangszahl des freien Körpers,
b	Luftdruck in mm Hg,
c	spezifische Wärme,
d	Durchmesser der Frigorimeterkugel,
E, e	Energie,
ε	Absorptionszahl für Strahlung in Bruchteilen der auffallenden Strahlung,
ε_1	Absorptionszahl des Körpers,
ε_2	Absorptionszahl des Gitters,
ε_3	Absorptionszahl der Zimmerwand,
F	Oberfläche,
G, H	Abkürzungen (s. Anhang).
i	ganze Zahl,
K	Abkürzung (s. S. 4),
k	Faktor,
L	Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion in mgcal/cm² min,
M	Masse der Frigorimeterkugel in mg,
n	undurchlässiger Teil der Gitterfläche in Bruchteilen der ganzen Fläche,
Q	Wärmekapazität der Frigorimeterkugel in mgcal/grad,
R	zur Erwärmung des Frigorimeters verwendete bzw. bei der Abkühlung frei werdende Wärmemenge in mgcal/cm² min,
r_2	Gitterradius,
σ	Stefan-Boltzmannsche Konstante = 0.824 . 10^{-7} mgcal/cm² min grad⁴,
S	Wärmeabgabe durch Strahlung in mgcal/cm² min,
S_f	effektive Ausstrahlung des freien Körpers,
S_g	effektive Ausstrahlung des geschützten Körpers,
T_1	Temperatur des Abkühlungskörpers in absoluter Skala,
t_1	Temperatur des Abkühlungskörpers in Celsiusskala,
T_2, t_2	Temperatur des Gitters,
T_3, t_3	Wandtemperatur,
T_0, t_0	Temperatur der Luft beim Frigorimeter von diesem aber unbeeinflußt,
T_a	Lufttemperatur im Abstand a vom Körper,
$U = 100\ \alpha_g/\alpha_f$	relative Wärmeübergangszahl,
v	Windgeschwindigkeit in m/sec,
v_f	Windgeschwindigkeit ohne Gitter,
v_g	Windgeschwindigkeit hinter einem Gitter,
V	Heizstromspannung in Volt,
W	zugeführte Wärmemenge in mgcal/cm² min,
W_1	abgegebene Wärmemenge in mgcal/cm² min,
z	Zeit in min.

1) Eine Zusammenstellung dieser Arbeiten findet sich bei K. Büttner, Abhandlungen des Pr. Meteorol. Instituts Bd. X, Nr. 5, 1934.

I. Überlegungen zur Schutzwirkung von Gittern.

a) Änderung des Strahlungsanteils.

Durch die Abkühlungsmessungen wird die gesamte Wärmeabgabe W_1 des Körpers bestimmt. Die Wärmeabgabe L durch Leitung und Konvektion kann man daraus berechnen, wenn die Wärmeabgabe S durch Strahlung bekannt ist. Es ist

$$L = W_1 - S.$$

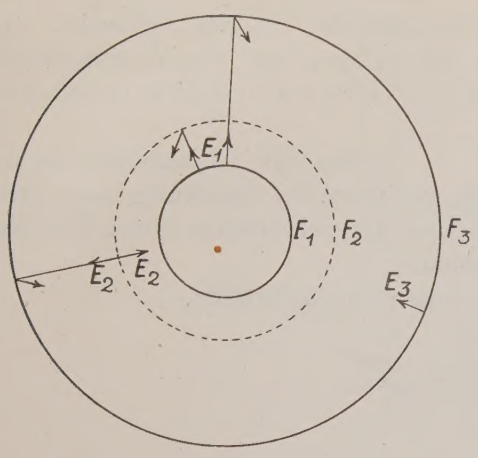

Abb. 1. Schematische Darstellung zur Berechnung des Strahlungsschutzes.

Die Wirkung eines diffus reflektierenden Gitters auf die effektive Ausstrahlung eines ebenfalls diffus reflektierenden Körpers kann abgeschätzt werden. Zur Vereinfachung der Rechnung denken wir uns statt des aus Drähten oder Fäden von einer bestimmten Dicke bestehenden Gitters eine diffus reflektierende durchbrochene Fläche.

Die nun vorliegende Aufgabe wollen wir uns an Hand der Abbildung 1 klarmachen.

Eine konvexe geschlossene Fläche F_1 sei umgeben von einer gleichfalls konvexen Fläche F_2 und diese von einer geschlossenen Fläche F_3. Von F_2 sei ein Teil, nämlich $n F_2$ für Strahlung vollkommen undurchlässig und habe außen und innen dasselbe Absorptionsvermögen ε_2; der übrige Teil, also $(1-n) F_2$ lasse die ganze auffallende Strahlung hindurch. T_1, T_2, T_3 seien die absoluten Temperaturen, ε_1, ε_2, ε_3 die Absorptionszahlen der Fächen, σ die Stefan-Boltzmannsche Konstante. Die undurchlässigen Teile sollen gleichmäßig auf der Fläche F_2 verteilt sein, d. h. von der Energie E_1, die F_1 ausstrahlt, soll $n E_1$ auf den undurchlässigen Teil von F_2 fallen.

Die Berechnung der effektiven Ausstrahlung der Fläche F_1 ist im Anhang (Seite 20 f.) durchgeführt; wir wollen hier nur das Ergebnis besprechen. Ist die Fläche F_3 sehr viel größer als die beiden anderen Flächen F_1 und F_2, so ist die von einem Quadratzentimeter der Fläche F_1 effektiv ausgestrahlte Energie

$$S_g = \sigma \varepsilon_1 \frac{(T_1^4 - T_2^4)\, n\, \varepsilon_2 + (T_1^4 - T_3^4)\,(1-n)}{1 - n\,(1 - \frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1)\,(1-\varepsilon_2)}. \tag{1a}$$

Aus obiger Formel erhält man nach Definition von n durch Einsetzen von $n = 0$ die Ausstrahlung eines freien Körpers in einem Raum, der im Verhältnis zum Körper sehr groß ist:

$$S_f = \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_3^4). \tag{1b}$$

Der Strahlungsschutz, den ein Gitter bietet, ist also

$$S_f - S_g = \sigma \varepsilon_1 n \frac{(T_1^4 - T_3^4)\left[\varepsilon_2\left(1 - \frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right) + \frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right] - (T_1^4 - T_2^4)\,\varepsilon_2}{1 - n\left(1 - \frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right)(1-\varepsilon_2)}. \tag{1c}$$

Aus dieser Formel ist die Abhängigkeit des Strahlungsschutzes von der Art des Gitters ersichtlich. Den Folgerungen wollen wir die Annahme zugrundelegen, daß der Körper wärmer ist als seine Umgebung und das Gitter eine Temperatur annimmt, die zwischen derjenigen des Körpers und derjenigen der äußeren Fläche F_3 liegt; d. h. es soll $T_1 > T_2 > T_3$ sein. Es folgt dann:

1. Der Strahlungsschutz wächst mit Vergrößerung des undurchlässigen Teils n von F_2.
2. Der Strahlungsschutz wächst mit steigender Temperatur T_2 des Gitters.
3. Um die Wirkung einer Änderung der Absorptionszahl ε_2 auf den Strahlungsschutz zu bestimmen, differentieren wir den Ausdruck nach ε_2. Es ergibt sich dabei, daß $\frac{\partial (S_f - S_g)}{\partial \varepsilon_2}$ positiv, negativ oder Null sein kann. Dementsprechend kann der Strahlungsschutz bei Vergrößerung der Absorptionszahl ε_2 zunehmen, abnehmen oder unverändert bleiben. Bezeichnet man mit K den Ausdruck

$$K = \frac{\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1}{1 - n\left(1 - \frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right)}$$

und setzt voraus, daß $n > 0$, d. h. das Gitter wirklich vorhanden ist, so gilt folgendes:
Ist $T_2^4 - T_3^4 < K (T_1^4 - T_3^4)$, so nimmt die Schutzwirkung mit abnehmendem ε_2 zu.
Ist $T_2^4 - T_3^4 > K (T_1^4 - T_3^4)$, so nimmt die Schutzwirkung mit wachsendem ε_2 zu.
Für $T_2^4 - T_3^4 = K (T_1^4 - T_3^4)$ ist die Schutzwirkung unabhängig von der Absorptionszahl des Gitters.

Da der unbedeckte Teil $1 - n > 0$, so ist $1 - n \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \varepsilon_1\right) > \frac{F_1}{F_2} \varepsilon_1$ d. h. $K < 1$. Wenn die Bedingung $T_2^4 - T_3^4 = K (T_1^4 - T_3^4)$ erfüllt ist, nimmt die Gittertemperatur also einen Wert zwischen Körpertemperatur und Außentemperatur an, infolgedessen können alle drei Fälle wirklich vorkommen. Bei niedrigen Gittertemperaturen ist die Reflexion des Gitters von ausschlaggebender Bedeutung; diese nimmt mit abnehmendem ε_2 zu. Bei hohen Gittertemperaturen überwiegt die Emission, die mit wachsendem ε_2 zunimmt.

4. Mit Verkleinerung der (aus durchlässigen und undurchlässigen Teilen bestehenden) Gitterfläche F_2 nimmt die Schutzwirkung zu; d. h. je näher das Gitter die warme Fläche umschließt, um so größer ist der Strahlungsschutz.

Schutzwirkung der bei den Versuchen benutzten Gitter.

Bei den in den nachfolgenden Kapiteln genauer beschriebenen Versuchen diente als Abkühlungskörper eine Frigorimeterkugel.

Es ist $\sigma = 0.824 \cdot 10^{-7}$ mgcal/cm² min grad⁴, $\varepsilon_1 > 0.75$, $F_1 = 7.5^2 \pi$ cm². Im Mittel war die Kugeltemperatur $T_1 = 310^0$ abs., die Wandtemperatur $T_3 = 288^0$ (absolute Temperatur). Die Lufttemperatur war durchschnittlich um 1^0 höher als die Wandtemperatur.

Die Gittertemperatur wurde mit Thermoelementen gemessen. Die Ergebnisse der Messung an dem kleinsten kugelförmigen Gitter, das in 6.5 mm Abstand die Kugel umgab, sind in Abbildung 2 in Polarkoordinaten dargestellt. Bei Windgeschwindigkeiten von 7.4 und 3.8 m/sec war das Gitter im Luv durchschnittlich um 0.5^0 wärmer als die vom Frigorimeter unbeeinflußte Luft. Im Lee betrug die Übertemperatur bis zu 6.2^0 C. Bei 1.3 m/sec ist die Gittertemperatur entsprechend der dickeren Grenzschicht höher; im Luv wurden 0.9^0, im Lee 7.1^0 Übertemperatur gemessen. Die mittlere Temperatur dieses Gitters ist bei 3.8 und 7.4 m/sec etwa 2^0, bei 1.3 m/sec 3^0 höher als die Lufttemperatur in größerer Entfernung vom Körper. Gitter in größerem Abstand von der Frigorimeterkugel werden weniger erwärmt. Bei der Berechnung von Tabelle 1 wurde einheitlich $T_2 = 291^0$ gesetzt.

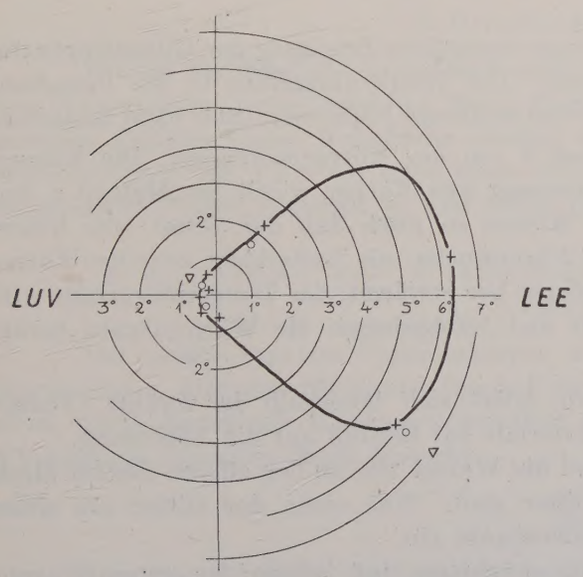

Abb. 2. Differenz zwischen der Gittertemperatur und der unbeeinflußten Lufttemperatur (Gitterabstand 6.5 mm).
$T_1 - T_0 = 17.0^0$, $v_f = 3.8$ m/sec (− + −),
$T_1 - T_0 = 19.2^0$, $v_f = 7.4$ m/sec (○),
$T_1 - T_0 = 19.0^0$, $v_f = 1.3$ m/sec (▽).

Zu den meisten Versuchen wurde ein stellenweise mit einer schwarzen Oxydschicht überzogenes Eisengitter verwendet; auf 4 cm² trafen 27² quadratische Maschen. Das Gitter war aus einem 0.23 mm starken Eisendraht geflochten. Daraus ergibt sich die Bedeckung $n = 0.53$. E. Schmidt[1]) gibt für Eisen bei 20^0 C folgende Absorptionszahlen an:

Eisenblech, frisch abgeschmirgelt	0.24
„ blank geätzt, dann rot gerostet . .	0.61
„ ganz rot verrostet	0.68

Bei unseren Rechnungen wurde $\varepsilon_2 = 0.4$ gesetzt.

Bei kugelförmigen Gittern mit verschiedenen Durchmessern erhält man unter Benützung obiger Zahlenangaben die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte.

[1]) Beihefte z. Gesundheitsing., R. 1, H. 20, 1927, S. 1.

Tabelle 1. Strahlungsschutz engmaschiger kugelförmiger Gitter.

Durchmesser des Gitters in mm	88	104	130	140	168
F_1/F_2	0.73	0.52	0.33	0.29	0.20
effektive Ausstrahlung	111	117	125	127	131
Strahlungsschutz $S_f - S_g$ in % der effektiven Ausstrahlung des freien Körpers $\left(S_f = 145 \frac{\text{mgcal}}{\text{cm}^2\text{min}}\right)$	24	19	14	12	10

Wirkung anliegender Gitter (Stoffe) auf die Strahlung.

Einen vollkommen anderen Einfluß als das bisher betrachtete, abstehende Gitter übt ein anliegendes auf die effektive Ausstrahlung eines Körpers aus. Hier tritt Wärme vom Körper zum Gitter (bzw. Stoff) durch direkte Leitung über. Die ausstrahlende Fläche setzt sich aus den freiliegenden Teilen des Körpers und dem Gitter zusammen. Die Ausstrahlung kann verringert werden, wenn die Absorptionszahl ε_2 des Gitters kleiner ist als diejenige (ε_1) des Körpers oder wenn das Gitter eine so geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, daß seine Außenfläche wesentlich niedrigere Temperaturen annimmt als die Oberfläche des unbedeckten Körpers. Da Stoffe für ultrarote Strahlung großes Absorptions-, somit auch Strahlungsvermögen besitzen, wird die Ausstrahlung eines Körpers bei Bedeckung mit anliegenden Stoffen im allgemeinen erhöht.

Marsh[1]) und v. Vintschger[2]) haben tatsächlich bei Windstille festgestellt, daß direkt auf den Körper gelegte Stoffe eine Vergrößerung der Wärmeabgabe hervorrufen. Marsh verwendet einen polierten Kupferzylinder und weist darauf hin, daß Stoffe eine 10mal größere Ausstrahlung besitzen als poliertes Kupfer. Büttner[3]) schließt aus der Zunahme der Ausstrahlung bei den Versuchen von v. Vintschger, daß die verwendete Kugel nur zu 50% schwarz war.

b) Änderung des Leitungsanteils.

Wir wollen vorerst von der Wirkung der Konvektionsänderung absehen und nur den unmittelbaren Einfluß des Gitters auf die Wärmeleitung betrachten.

Besteht ein Abstand zwischen Gitter und Körperoberfläche, so können folgende Fälle eintreten:

1. Das Gitter ist soweit vom Körper entfernt, daß keine wesentliche Erhöhung der Gittertemperatur über die vom Körper unbeeinflußte Lufttemperatur stattfindet. Das Temperaturgefälle in der Umgebung des Körpers und somit die Wärmeabgabe durch Leitung wird in diesem Falle vom Gitter nicht beeinflußt.

2. Das Gitter befindet sich in einem geringen Abstand a von der Körperoberfläche. Die Körpertemperatur T_1 und die Lufttemperatur T_0 in größerer Entfernung vom Körper würde im Abstand a eine Lufttemperatur T_a zur Folge haben. Ist die zugestrahlte Wärme so groß, daß das Gitter eine höhere Temperatur als T_a annimmt, so wirkt das Gitter als zweite Wärmequelle; die Luftschicht zwischen Körper und Gitter wird einerseits vom Gitter, andererseits vom Körper her erwärmt; das Temperaturgefälle wird also, wenn der Gitterabstand genügend klein ist, erniedrigt und infolgedessen die Wärmeabgabe herabgesetzt.

Da das Gitter von der Innenseite her erwärmt wird, bildet sich innerhalb der Drähte (Fäden) ebenfalls ein Temperaturgefälle, und die Leitfähigkeit des Materials hat Einfluß auf die Abkühlung.

Berührt das Gitter den Körper, so wird die Wärme nur an den offenen Stellen direkt an die Luft geleitet; im übrigen findet Leitung durch das Gitter statt. Nur wenn das Gitter aus einem schlechten Leiter besteht, tritt eine Verminderung der Wärmeabgabe ein.

Bei unseren Versuchen mit Metallgittern kann man annehmen, daß infolge der guten Wärmeleitung durch die Drähte der Leitungsanteil im Vergleich zum offenen Körper wenig oder gar nicht geändert wird. Bei Stoffen ist die Leitungsänderung wesentlich.

1) Proc. Phys. Soc. 47, 1930.
2) Archiv für Hygiene Bd. 101, H. 5, 1929.
3) A. a. O.

c) Änderung des Konvektionsanteils.

Befindet sich ein Körper in strömender Luft, so haben Leitung und Konvektion den Hauptanteil an der Wärmeabgabe. (Das Verhältnis der Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion zu derjenigen durch Strahlung ist aus Tabelle 2 Seite 11 für ein spezielles Beispiel zu ersehen).

Die Schutzwirkung eines den Körper umgebenden Gitters beruht deshalb hauptsächlich in der Änderung der Konvektion. Der Untersuchung des Einflusses dieser Konvektionsänderung auf die Wärmeabgabe eines Körpers sollen die im nachfolgenden beschriebenen Versuche dienen.

II. Versuchsanordnung.

a) Windkanal.

Die Versuche wurden im Freistrahl eines Windkanals ausgeführt. Bei Windgeschwindigkeiten von 1.3 bis 7.5 m/sec hatte die Kanalöffnung 60 cm Durchmesser; bei 10.5 m/sec wurde sie auf 50 cm verengt.

Bei den meisten Messungen befanden sich die Geräte in 45 cm Abstand vom Rand des Kanals in der Längsachse desselben.

Eine Ausmessung des Windfeldes mit einem 4-Schalenanemometer (Durchmesser des Schalenkreuzes 78 mm) hatte in Übereinstimmung mit Kontrollmessungen mit einem Staurohr nach Prandtl folgende Ergebnisse:

1. Zeitliche Änderung der Windgeschwindigkeit.

Bei gleichen Versuchsbedingungen wurde die Windgeschwindigkeit an verschiedenen Tagen gemessen. Es zeigte sich dabei, daß das Windfeld innerhalb der Meßgenauigkeit (0.1 m/sec) unverändert bleibt. Kurzdauernde Schwankungen der Windgeschwindigkeit konnten mit einem Hitzdrahtanemometer von geringer Trägheit (Beschreibung Seite 8) beobachtet werden; diese Messungen wurden bei mittleren Windgeschwindigkeiten von 1 bis 4 m/sec ausgeführt. Die Schwankungen des Galvanometerausschlages entsprachen einer Schwankung der Windgeschwindigkeit um ± 0.3 m/sec.

2. Längsschnitt des Strahles.

Die Windgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Abstand von der Windkanalöffnung etwas ab. Bei den benutzten Windgeschwindigkeiten (zwischen 1.3 und 10.8 m/sec) war in 65 cm Abstand vom Windkanal die Geschwindigkeit nur um 0.1 m/sec kleiner als in 15 cm Abstand.

3. Querschnitt des Strahles.

Beträgt die Windgeschwindigkeit mehr als 3.5 m/sec und mittelt man die Windgeschwindigkeit über eine konzentrische Kreisfläche mit 30 cm Durchmesser, so weichen die Windgeschwindigkeiten an den einzelnen Punkten dieser Kreisfläche weniger als 0.4 m/sec vom Mittelwert ab. Bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 1.3 m/sec lagen diese Abweichungen innerhalb der Meßgenauigkeit. Allgemein lagen die einzelnen Werte zwischen 94 und 106% des Mittelwertes.

4. Änderung der Windgeschwindigkeit beim Hereinbringen des Versuchskörpers.

Der größte benutzte Versuchskörper war ein zylindrisches Gitter von 40 cm Höhe und 17 cm Durchmesser. Mit dem Straurohr (nach Prandtl) wurde seitlich in 17 cm Entfernung von der Zylinderachse 104% derjenigen Windgeschwindigkeit gemessen, die unter sonst gleichen Umständen im leeren Windfeld an derselben Stelle herrscht.

b) Frigorimeter.

Die Schutzwirkung von Gittern wurde in der Weise festgestellt, daß die Abkühlung einer Frigorimeterkugel zuerst im freien Luftstrahl und dann hinter verschiedenen Gittern gemessen wurde. Es wurde ein Frigorimeter nach Dorno und Thilenius[1]) benutzt, d. i. eine massive, elektrisch geheizte Kupferkugel von 7.5 cm Durchmesser.

[1]) Meteorol. Zeitschr. **42**, 1925.

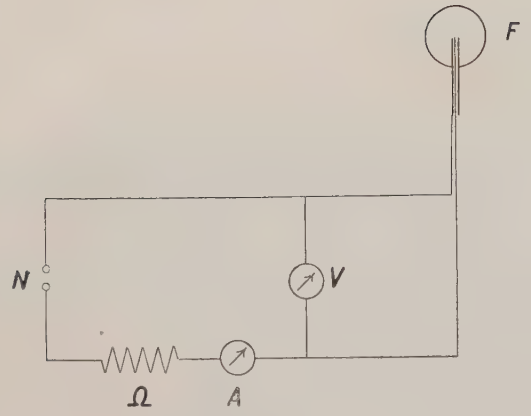

Abb. 3. Heizschaltung des Frigorimeters (A = Ampèremeter, V = Voltmesser, Ω = Widerstand, F = Frigorimeter, N = Netzanschluß).

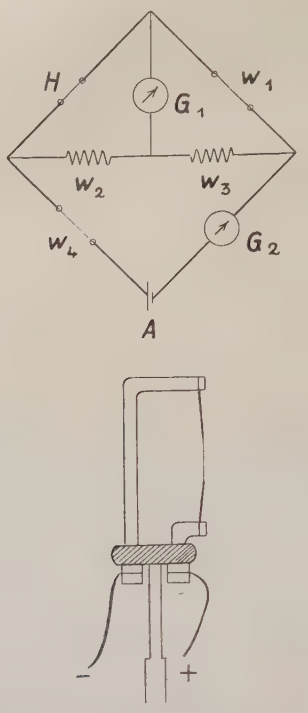

Abb. 4. Hitzdrahtwindmesser und seine Schaltung (H = Hitzdraht, w_1, w_2, w_3, w_4 = Widerstände, G_1 = Brückengalvanometer, A = Akkumulator, G_2 = Galvanometer zur Kontrolle des Akkumulators).

Die Auswertung erfolgte im Anschluß an die Untersuchungen von Büttner[1]). Es wurde deshalb nicht mit dem Kontaktsystem gearbeitet, sondern mit konstant gehaltenem Strom geheizt. Die Schaltung ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Der Strom wurde ständig überwacht und bei Schwankungen der Netzspannung durch Verstellen des vorgeschalteten Schiebewiderstands konstant gehalten.

Im folgenden sind die Größen aufgezählt, die bei allen Frigorimeterversuchen gemessen wurden.

A Heizstromstärke in Ampère,

V Heizstromspannung in Volt,

T_1 Temperatur des Frigorimeters; sie wurde von einem in die Bohrung der Frigorimeterkugel gesteckten Quecksilberthermometer angezeigt. Die Ablesung erfolgte auf 0.2° genau. Die Oberflächentemperatur ist etwas niedriger als diese im Inneren gemessene Temperatur,

T_0 Temperatur des Luftstromes (vom Frigorimeter unbeeinflußt) wurde mit zwei Stationsthermometern gemessen,

T_3 Temperatur in der Nähe der Zimmerwand außerhalb des Luftstromes wurde mit einem Quecksilberthermometer gemessen,

b Luftdruck am Stationsbarometer, im gleichen Stockwerk.

Die Übertemperaturen $(T_1 - T_0)$ der Kugel lagen zwischen 10° und 27°.

c) Hitzdrahtwindmesser.

Ein Platindraht von 1 cm Länge und 10 μ Stärke war zwischen 2 Kupferdrähte gelötet und in einen Metallrahmen gespannt. Der Draht wurde als Zweig einer Weatstoneschen Brücke geschaltet (Abbildung 4). Die übrigen Widerstände blieben während der Messung unverändert; sie waren für den Meßbereich so einreguliert, daß der Platindraht bei der kleinsten Windgeschwindigkeit gerade zur Rotglut kam. Der Ausschlag des Brückengalvanometers war ein Maß für die Windgeschwindigkeit. Unmittelbar vor und nach der eigentlichen Messung erfolgte die Eichung; als Normalinstrument diente ein Staudruckwindmesser nach Prandtl.

[1]) A. a. O.

III. Grundlagen der Auswertung.

a) Der Wärmehaushalt der Frigorimeterkugel.

1. Zugeführte Wärme.

Bedeutet A die Heizstromstärke in Ampère, V die Heizstromspannung in Volt, so beträgt die dem Frigorimeter zugeführte Energie 14.34 AV cal/min.

Das Frigorimeter hat den Durchmesser d = 7.5 cm; auf 1 cm^2 der Oberfläche trifft die Energie

$$W = 81.2\ AV\ {}^{mgcal}/_{cm^2\ min}\ . \tag{1}$$

2. Durch Leitung und Konvektion abgegebene Wärme.

Bedeutet σ die Wärmeübergangszahl durch Leitung und Konvektion in ${}^{mgcal}/_{cm^2\ min\ grad}$, t_1 die Temperatur der Kugeloberfläche, t_0 die Lufttemperatur, so ist die Wärmeabgabe eines cm^2 der Kugeloberfläche in der Minute

$$L = \alpha\ (t_1 - t_0)\ {}^{mgcal}/_{cm^2\ min}\ . \tag{2}$$

3. Durch Strahlung abgegebene Wärme.

Bedeutet σ die Stefan-Boltzmannsche Konstante, T_1 die absolute Temperatur der Frigorimeteroberfläche, T_3 die absolute Temperatur der Zimmerwände, ε die Absorptionszahl der Frigorimeteroberfläche in Bruchteilen der auffallenden Strahlung, so ist nach Seite 4 die effektive Ausstrahlung des Frigorimeters

$$S_f = \sigma\ \varepsilon\ (T_1^4 - T_3^4)\ {}^{mgcal}/_{cm^2\ min}\ . \tag{3}$$

Die Absorption der Strahlung durch die Luft kann man unberücksichtigt lassen, da zwischen der Luft und den Zimmerwänden während der Versuche nur geringe Temperaturdifferenz bestand.

Hat das Frigorimeter konstante Temperatur, so ist

zugeführte Wärmemenge = abgegebene Wärmemenge,

d. h. $W = L + S.$

4. Temperaturänderungen.

Temperaturanstieg. Wird mehr Wärme zugeführt, als bei den herrschenden Temperatur- und Windverhältnissen abgegeben wird, so bleibt ein Teil der in der betrachteten Zeiteinheit zugeführten Wärme in der Kugel; infolgedessen steigt die Frigorimetertemperatur. Die zurückbleibende Wärme kann man aus dem Temperaturanstieg $\frac{dT_1}{dz}\ {}^{grad}/_{min}$ und der Wärmekapazität Q ${}^{mgcal}/_{grad}$ der Kugel berechnen. Bezieht man diese Wärmemenge, ebenso wie alle vorher in die Wärmebilanz eingesetzten Wärmemengen, auf die Einheit der Oberfläche, so erhält man die zurückbleibende Wärme

$$R = \frac{Q}{F} \cdot \frac{dT_1}{dz}\ {}^{mgcal}/_{cm^2\ min}\ .$$

Die Kugel hat die Masse M = 1 865 000 mg, die Oberfläche F = 176.7 cm^2. Die spezifische Wärme von Kupfer ist c = 0.094 (Kohlrausch[1]).

Es ist also

$$R = 992\ \frac{dT_1}{dz}\ {}^{mgcal}/_{cm^2\ min}\ . \tag{4}$$

Steigt die Temperatur des Frigorimeters, so ist:

Zugeführte Wärme = abgegebene Wärme + zur Erhöhung des Wärmeinhalts verwendete Wärme,

d. h. $W = L + S + R.$

Temperaturabnahme. Wird hingegen mehr Wärme abgegeben als zugeführt, so wird die Frigorimeterkugel sich abkühlen. Es wird dabei der Wärmeinhalt des Frigorimeters analog um

$$|R| = \left| 992\ \frac{dT_1}{dz} \right|\ {}^{mgcal}/_{cm^2\ min}$$

[1]) F. Kohlrausch, Praktische Physik. Leipzig und Berlin 1935.

verringert. Es gilt dann die Beziehung:

Zugeführte Wärme + Erniedrigung des Wärmeinhalts der Kugel = abgegebene Wärme,

d. h. $$W + |R| = L + S.$$

$R = 992 \frac{dT_1}{dz}$ ist bei Temperaturanstieg positiv, bei Temperaturabnahme negativ, bei konstanter Temperatur Null; es gilt daher allgemein

$$W = L + S + R. \tag{5}$$

Dabei wird die Wärmeleitung durch den Stab, auf dem die Frigorimeterkugel sitzt, wie bei früheren Messungen (Literaturverzeichnis[1]) vernachlässigt.

Was ist uns in der Wärmegleichung (5) bekannt?

W ist aus der gemessenen Heizstromstärke und Spannung nach Gl. (1) zu berechnen.

L ist nach Gl. (2) abhängig von der Wärmeübergangszahl α. Büttner[2]) hat α als Funktion der Windgeschwindigkeit v (m/sec), des Luftdruckes b (mm Hg) und des Kugeldurchmessers d (cm) dargestellt durch die Formel

$$\alpha = \frac{0{,}070}{d} \left(v.\, d.\, \frac{b}{760} \right)^{0{,}52} \text{ cal / cm}^2 \text{ min grad} \tag{6}$$

für den Bereich der Windgeschwindigkeit $0.2 < v < 20$ m/sec.

R kann nach Gl. (4) aus der Temperaturänderung dt_1/dz berechnet werden. Trägt man die Zeit als Abszisse, die Frigorimetertemperatur als Ordinate an, so gibt die Neigung der Tangente in einem Punkt der Kurve die Temperaturänderung in dem betreffenden Zeitpunkt. Bei großen Temperaturänderungen ist R ein wesentliches Glied der Gleichung (5); ist die Temperaturänderung gering, so hat R nur die Bedeutung eines Korrekturgliedes. Die Größenordnung von R ist aus Tabelle 2 Seite 11 ersichtlich. Konstante Frigorimetertemperatur ließ sich bei der Ausführung der Versuche nicht herstellen, da die Luft durch den Windkanalmotor um ungefähr 0.01 grad/min erwärmt wird. Es wurde aber immer so lange beobachtet, bis die Temperaturänderung $\frac{dt_1}{dz}$ möglichst gering war, d. h. in 10 min 0.1^0 bis 0.2^0 betrug.

S ist in Gleichung (5) unbekannt, da wir die Absorptionszahl unseres Frigorimeters nicht kennen.

b) Bestimmung der Absorptionszahl ε der Frigorimeterkugel.

Das Frigorimeter wurde frei im Windstrahl aufgestellt und solange geheizt bis die Übertemperatur $(T_0 - T_1)$ konstant blieb. Mit an Stelle der Frigorimeterkugel gesetzten Schalenkreuz- und Hitzdrahtanemometern (nach Albrecht) wurde die Windgeschwindigkeit gemessen. $\alpha = f(vb)$ wurde der in logarithmischem Maßstab dargestellten Beziehung (Gl. 6) entnommen.

Somit ist W, R und L bekannt und $S = W - L - R$ kann berechnet werden. Aus Gleichung (3) folgt $$\varepsilon = S_f/\sigma \, (T_1^4 - T_3^4).$$

Die Messungen wurden abends im unbeleuchteten und ungeheizten Zimmer ausgeführt, so daß keine Einstrahlung außer der Temperaturstrahlung der Wände usw. vorhanden war.

Bei großen Windgeschwindigkeiten erfolgt nur ein geringer Teil der gesamten Wärmeabgabe durch Strahlung. Eine ungenaue Bestimmung der durch Leitung und Konvektion abgegebenen Wärmemenge L kann deshalb einen großen Fehler bei der Berechnung von ε verursachen. Bei kleineren Windgeschwindigkeiten wird der Anteil der durch Leitung und Konvektion abgegebenen Wärme geringer. Messungen bei kleineren Windgeschwindigkeiten liefern deshalb genauere Werte von ε.

Die Versuche ergaben die in Tabelle 2 zusammengestellten Werte.

---

1) K. Büttner, a. a. O. – R. Faust, Veröff. d. Geophys. Inst. d. Univ. Leipzig. 2. Ser., Bd. 8, 1935. – von Vintschger, a. a. O.

2) A. a. O.

Tabelle 2. Wärmeabgabe des Frigorimeters.

W	R	L	S	$\frac{dt_1}{dz}$	v	α	t_0	t_1	ε
498	3	404	91	0.003	1.3	29.3	15.6	29.4	0.73
979	14	772	193	0.014	1.25	28.9	15.3	42.0	0.75
650	10	546	94	0.010	1.9	36.2	15.1	30.2	0.70

Bei allen folgenden Rechnungen wurde $\varepsilon = 0.75$ gesetzt. Man erhält dann aus Gl. (3)

$$S = 0.62\ (T_1^4 - T_3^4)\ 10^{-7}\ ^{mgcal}/_{cm^2\,min}. \qquad (3a)$$

Aus Tabelle 2 ist auch ersichtlich, daß die Strahlung einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der Wärmeabgabe hat.

c) Bestimmung der Wärmeübergangszahl α.

Führt man eine Messung mit dem Frigorimeter aus, wobei der Heizstrom (A, V), die Frigorimetertemperatur (T_1), Lufttemperatur (T_0) und Wandtemperatur (T_3) und der Luftdruck (b) gemessen werden, so kann man, ohne die Windgeschwindigkeit (v) zu kennen, die Wärmeübergangszahl α berechnen. Geht man von der vorhin aufgestellten Gleichung

$$W = L + S + R \qquad (5)$$

aus und setzt die Gleichungen 1, 2, 3 a und 4 ein, so ergibt sich

$$81.2\ A.\ V = \alpha\ (T_1 - T_0) + 0.62\ (T_1^4 - T_3^4)\ 10^{-7} + 992\ \frac{dT_1}{dz}.$$

α kann daraus, da alle übrigen Größen bekannt sind, berechnet werden. Es ist

$$\alpha = \frac{W - S - R}{T_1 - T_0}.$$

Um eine Grundlage für die Versuche mit Gittern zu erhalten, wurde vorerst das ungeschützte Frigorimeter in dem Windstrahl aufgestellt und bei 10.9, 7.2, 3.8 und 1.9 m/sec Windgeschwindigkeit, sowie bei abgeschaltetem Motor in der natürlichen Luftbewegung im ungeheizten Zimmer die Wärmeübergangszahl α bestimmt.

Die so erhaltenen Werte von α sind in Abbildung 5 in Abhängigkeit vom Produkt b.v in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Diese Beziehung wird, ebenso wie die von Büttner angegebene Gesetzmäßigkeit (Gl. 6) durch eine Gerade dargestellt. Beide Geraden schneiden sich selbstverständlich in demjenigen Punkt, der 1.3 m/sec Windgeschwindigkeit entspricht; denn bei der Berechnung von α wird die bei 1.3 m/sec bestimmte Absorptionszahl ε benutzt; es ist also die von Büttner bei 1.3 m/sec bestimmte Wärmeübergangszahl α zugrundegelegt. Die durch eigene Versuche gefundene Gerade hat eine etwas größere Neigung, d. h. bei großen Windgeschwindigkeiten ergaben sich etwas größere Wärmeübergangszahlen; z. B. ist bei v = 10 m/sec und b = 720 mm Hg nach eigenen Messungen α = 93 mgcal/cm² min grad, nach Büttner α = 85 mgcal/cm² min grad. Die Abweichung beträgt also 9%; bei geringeren Windgeschwindigkeiten ist die prozentuale Abweichung kleiner[1]).

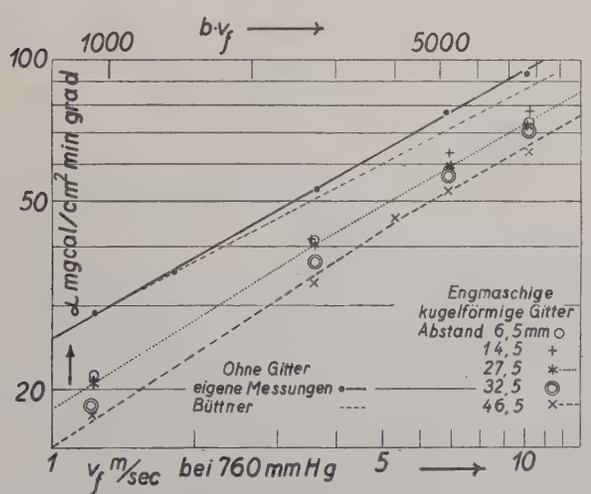

Abb. 5. Wärmeübergangszahl des Frigorimeters als Funktion der Windgeschwindigkeit.

Die eigenen Messungen ergaben die Beziehung

$$\alpha = \frac{0{,}06}{d}\left(\text{v. d. }\frac{b}{760}\right)^{0{,}57}\ cal/cm^2\,min\ grad \qquad (6a)$$

[1]) Aus der graphischen Darstellung der Windfunktion für Kugeln bei Büttner (a. a. O., S. 15) sieht man, daß alle von Büttner gefundenen eingetragenen Punkte für höhere Windgeschwindigkeiten ebenfalls oberhalb der gezogenen Geraden liegen.

oder, wenn man d = 7.5 cm einsetzt

$$\alpha = 0.58\ (\text{v. b.})^{0.57}\ \text{cal/cm}^2\,\text{min grad}. \qquad (7)$$

Auf diese Wärmeübergangszahl des freien Frigorimeters werden alle späteren Messungen bezogen.

IV. Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Windgeschwindigkeit.

a) Engmaschige, kugelförmige Eisengitter.

Die meisten Versuche wurden mit dem auf Seite 5 beschriebenen engmaschigen Eisengewebe durchgeführt. Die Gitter waren im allgemeinen aus 4 Teilen – das kleinste Gitter aus 3 Teilen – mit feinem Draht zusammengenäht, um die Kugel gelegt und am Stab, auf dem die Kugel sitzt, befestigt. Ein zwischen Stab und Gitter gelegtes Stück Filz sollte die Wärmeleitung durch den Stab zum Gitter herabsetzen.

Das Frigorimeter wurde, mit diesen Gittern umgeben, in Luftströmen von verschiedener Geschwinddigkeit aufgestellt und die auf Seite 8 aufgezählten Größen gemessen. Wie im Kapitel III auseinandergesetzt, ist

$$\alpha = \frac{W - S - R}{T_1 - T_0}.$$

W und R wurden ebenso berechnet wie beim freien Frigorimeter; die Formel zur Berechnung der effektiven Ausstrahlung S_g der geschützten Kugel ist auf Seite 4 angegeben. Bedeutet v_f die Windgeschwindigkeit ohne Gitter, α_f die Wärmeübergangszahl der freien Kugel, α_g diejenige der bedeckten Kugel, so ist

$$\alpha_g = \frac{W - S_g - R}{T_1 - T_0}.$$

In Abbildung 5 ist α_g in Abhängigkeit vom Produkt von Windgeschwindigkeit und Luftdruck ($v_f \cdot b$) in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Wir greifen irgend eines der benutzten Gitter heraus und verbinden die Punkte, die bei konstantem Gitterabstand und verschiedenen Windgeschwindigkeiten gefunden wurden. Bei höheren Windgeschwindigkeiten, etwa von 4 m/sec an, liegen die Punkte auf einer Geraden, welche zu der für die freie Kugel bestimmten parallel ist.

Zu jeder durch Versuche hinter Gittern gefundenen Wärmeübergangszahl α_g läßt sich aus Abbildung 5 die Wärmeübergangszahl α_f bestimmen, die man unter sonst gleichen Umständen bei ungeschützter Kugel erhalten würde. Aus der Parallelität der Geraden folgt:

$$\log \alpha_g = \log \alpha_f + \log k, \qquad (1)$$

dabei bedeutet k eine Konstante, die für $v_f > 4$ m/sec von der Windgeschwindigkeit unabhängig ist.

Da $\alpha_g < \alpha_f$, ist $k < 1$.

Aus Gleichung (1) erhält man $\alpha_g = k \cdot \alpha_f$. (2)

$100\ k = 100\ \frac{\alpha_g}{\alpha_f} = Ü$ ist die Wärmeübergangszahl des geschützten Frigorimeters in Prozenten der bei gleichen äußeren Umständen geltenden Wärmeübergangszahl des freien Frigorimeters. Wir wollen die Größe Ü als relative Wärmeübergangszahl, α_f und α_g im Gegensatz dazu als absolute Wärmeübergangszahlen bezeichnen.

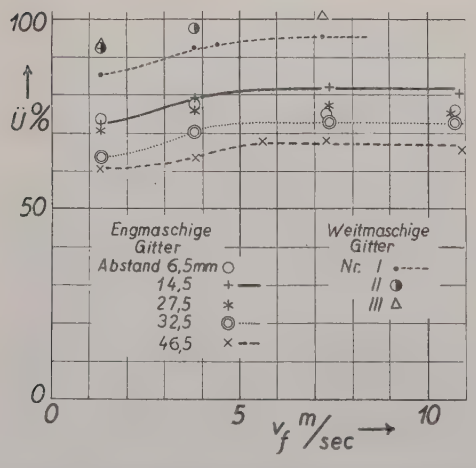

Abb. 6. Relative Wärmeübergangszahl hinter kugelförmigen Gittern als Funktion der Windgeschwindigkeit.

Die Versuche zeigen also:

Für Windgeschwindigkeiten v_f zwischen 4 und 11 m/sec ist die relative Wärmeübergangszahl Ü von der Windgeschwindigkeit unabhängig.

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, ist die relative Wärmeübergangszahl Ü bei $v_f = 1.3$ m/sec kleiner als bei höheren Windgeschwindigkeiten. Dies kann man folgendermaßen erklären:

Jeder Draht des Gitters ist von einer Grenzschicht umgeben, innerhalb welcher die Windgeschwindigkeit einen niedrigeren Wert annimmt als in der Mitte der Masche (Abbildung 7). Die Ausbildung dieser Grenzschicht an den Maschenrändern hat dieselbe Wirkung wie eine Verkleinerung der Öffnung. Es tritt weniger Luft ein, die aufgezwungene Strömung im Inneren des Gitters und somit die Wärmeabgabe der Kugel wird herabgesetzt. Bei höheren Windgeschwindigkeiten wird die Grenzschicht so dünn, daß sie keinen merklichen Einfluß ausüben kann.

Für die frei aufgestellte Frigorimeterkugel wurde eine Beziehung zwischen der Wärmeübergangszahl α_f und der Windgeschwindigkeit v_f gefunden; sie ist durch die Gleichung

$$\alpha_f = 0.58\ (v_f \cdot b)^{0.57} \qquad (7)$$

und durch die oberste Gerade in Abbildung 5 dargestellt. Wird hinter Gittern eine Wärmeübergangszahl α_g bestimmt, so wollen wir diejenige Windgeschwindigkeit v_g als effektive Windgeschwindigkeit bezeichnen, welche die Gleichung

$$\alpha_g = 0.58\ (v_g \cdot b)^{0.57} \qquad (7a)$$

erfüllt; d. h. zu jeder gemessenen Wärmeübergangszahl α_g kann man aus Abbildung 5 die zugehörige effektive Windgeschwindigkeit v_g entnehmen.

Wie vorhin festgestellt wurde, ist für Windgeschwindigkeiten über 4 m/sec die relative Wärmeübergangszahl konstant. Nun ist nach Gleichung (7) und (7 a)

$$\ddot{U} = 100\,\frac{\alpha_g}{\alpha_f} = 100\left(\frac{v_g}{v_f}\right)^{0.57},$$

also

$$\frac{v_g}{v_f} = \left(\frac{\ddot{U}}{100}\right)^{1.76}.$$

Abb. 7. Skizze z. Erklärung der Verringerung der relativ. Wärmeübergangszahl bei kleinen Windgeschwindigkeiten.

Aus der Konstanz der relativen Wärmeübergangszahl $\ddot{U}$ folgt: Für Windgeschwindigkeiten v_f zwischen 4 und 11 m/sec beträgt die effektive Windgeschwindigkeit v_g einen bestimmten Bruchteil der ungestörten Windgeschwindigkeit v_f.

b) Weitmaschige, kugelförmige Eisengitter.

Es wurde die Schutzwirkung dreier weitmaschiger kugelförmiger Gitter bestimmt. Durch das Biegen hatten die Maschen verschiedene Größen erhalten; in nachfolgender Zusammenstellung sind deshalb die Mittelwerte angegeben.

Tabelle 3. Verzeichnis der weitmaschigen Gitter.

Gitter Nr.	Maschenlänge (mm)	Maschenbreite (mm)	Drahtstärke (mm)	n (s. S. 4)	Kugeldurchmesser (mm)	Abstand von der Fr.-Oberfl. (mm)	Material
I	8.1	7.4	1.0	0.26	210	67.5	verzinkter Eisendraht
II	8.3	7.2	1.0	0.26	90	7.5	verzinkter Eisendraht
III	7.0	5.7	0.6	0.20	178	51.5	roher Eisendr.

Abbildung 6 zeigt für alle untersuchten kugelförmigen Gitter die Abhängigkeit der relativen Wärmeübergangszahl von der Windgeschwindigkeit. Wie man sieht, haben die Kurven für weit- und engmaschige Gitter dieselbe Form.

c) Engmaschige, zylinderförmige Eisengitter.

Aus demselben Eisengewebe, wie es bei den engmaschigen kugelförmigen Gittern Verwendung fand, wurden 40 cm hohe Zylinder angefertigt. Diese wurden an den beiden Enden mit Holzscheiben verschlossen und senkrecht zum Windstrahl aufgestellt. Der Mittelpunkt des Frigorimeters befand sich auf der Zylinderachse in 20 cm Abstand von den beiden Grundflächen.

Strahlungsschutz. Bei der Berechnung des Strahlungsschutzes, den ein Gitter bietet (Abschnitt I a) wurde statt des Gitters eine durchbrochene Fläche betrachtet. Dies bringt natürlich einen Fehler mit sich; denn für Strahlen, die unter einem gewissen (kleinen) Winkel auffallen, ist das Gitter bereits undurchlässig. Bei Kugeln tritt dies weniger in Erscheinung als bei den langen Zylindern. Außerdem wurden von den Grundflächen der Zylinder bei den

Zylinderdurchmessern	88,	104,	140,	170 mm
jeweils	2,	2,	6,	8%

des vollen Raumwinkels verdeckt. Die benutzten Zylinder lassen also weniger Strahlung austreten als eine aus dem gleichen Gitter angefertigte Kugel.

Andererseits kann man aber annehmen, daß die Temperatur des Gitters im größten Teil desselben sich nicht wesentlich von der vom Frigorimeter unbeeinflußten Lufttemperatur unterscheidet. Die Fläche des zylindrischen Gitters ist größer als die der verwendeten Kugelgitter. Die beiden letzten Tatsachen tragen, wie aus der Formel (1 c) Abschnitt I a ersichtlich, im Vergleich zum Strahlungsschutz kugelförmiger Gitter zur Verringerung des Strahlungsschutzes bei.

Aus diesen Gründen ist der Strahlungsschutz, den ein zylindrisches Gitter bietet, nicht wesentlich von demjenigen bei kugelförmigen Gittern verschieden. Bei letzteren betrug der Strahlungsschutz unter den Versuchsbedingungen rund 1 mgcal/cm² min grad. Bei der Berechnung der Wärmeübergangszahl hinter zylindrischen Gittern wurde die Ausstrahlung des freien Frigorimeters unter sonst gleichen Umständen berechnet und angenommen, daß durch das Gitter die Ausstrahlung um 1 mgcal/cm² min grad verringert wird.

Diese ungenaue Bestimmung des Strahlungsschutzes fällt weniger ins Gewicht, da mit zylindrischen Gittern nur Messungen bei höheren Windgeschwindigkeiten ausgeführt wurden, wobei der Strahlungsanteil klein im Vergleich zum Leitungs- und Konvektionsanteil wird.

Mit zylindrischen Gittern wurden Messungen bei den Windgeschwindigkeiten $v_f = 3.8$ und 7.3 m/sec ausgeführt und die relative Wärmeübergangszahl bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 zusammengestellt.

Tabelle 4. Relative Wärmeübergangszahl hinter engmaschigen, zylindrischen Gittern.

Durchmesser des Zylinders in mm	88	104	170
Relative Wärmeübergangszahl bei $v_f = 3.8$ m/sec	83	74	63
Relative Wärmeübergangszahl bei $v_f = 7.3$ m/sec	81	77	62

Die relativen Wärmeübergangszahlen bei diesen beiden Windgeschwindigkeiten nehmen – bei konstantem Zylinderdurchmesser – annähernd gleiche Werte an. Es gilt also dieselbe Gesetzmäßigkeit wie für kugelförmige Gitter.

d) Stoffe.

Siegenthaler[1]) führte Versuche mit einem geschlossenen Metallzylinder aus, der elektrisch geheizt und mit mehreren zylinderförmigen Mänteln aus Baumwolltrikot umgeben wurde; dort zeigte sich die bei kleinen Windgeschwindigkeiten erhöhte Schutzwirkung noch viel deutlicher als bei vorliegenden Versuchen mit Metallgittern.

V. Abhängigkeit der Schutzwirkung von der Maschenweite.

Mit weitmaschigen Gittern wurden nur wenig Versuche ausgeführt. Wie Abbildung 6 zeigt, haben die benutzten Gitter, bei denen 74 bzw. 80% der ganzen Fläche offen waren, nur ganz geringe Schutzwirkung. Der Schutz, den ein Gitter gegenüber der Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion bietet, nimmt also mit der Vergrößerung der Maschenweite sehr stark ab.

Trotzdem darf die Wirkung eines weitmaschigen Gitters nicht unterschätzt werden. Es wurde bisher nur Herabsetzung der Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion betrachtet. Außerdem wirkt aber ein Gitter, wie in Kapitel I auseinandergesetzt wurde, auch als Strahlungsschutz. Bei den Versuchsbedingungen (d. h. bei rund 17° Temperaturdifferenz zwischen Kugel und Wänden und 4° Temperaturdifferenz zwischen Gitter und Wänden) wurde die Ausstrahlung der Kugel bei dem kleinen Gitter II, wie die Rechnung ergab, um rund 15% herabgesetzt. Dieser Strahlungsschutz ist, wie schon früher erwähnt, bei Windstille oder geringer Luftbewegung für die gesamte Wärmeabgabe des Körpers von großer Bedeutung.

Dies zeigt auch eine Beobachtungsreihe, die I. M. Stagg[2]) durchführte. Dort wurden Minimumthermometer, die 25 mm über dem Boden befestigt waren, mit einem 50×25×15 cm großen Käfig mit 19 mm Maschenweite aus 1.6 mm starkem verzinktem Draht umgeben. Diese geschützten Thermometer zeigten nachts bis zu 1° C höhere Temperaturen als ein ungeschütztes Vergleichsthermometer.

VI. Abhängigkeit der Schutzwirkung vom Gitterabstand.

a) Kugelförmige Gitter.

Wie aus den Abbildungen 5 und 6 schon zu sehen war, hat dasselbe „Gewebe" bei verschiedenen Abständen von der Kugeloberfläche verschiedene Schutzwirkung. Da bei weitmaschigen Gittern

[1]) Bioklim. Beiblätter. Reihe 1, 1934, 25 und 1936, 2.
[2]) Met. Off. profess. notes N. 43, vol. 43, London 1925.

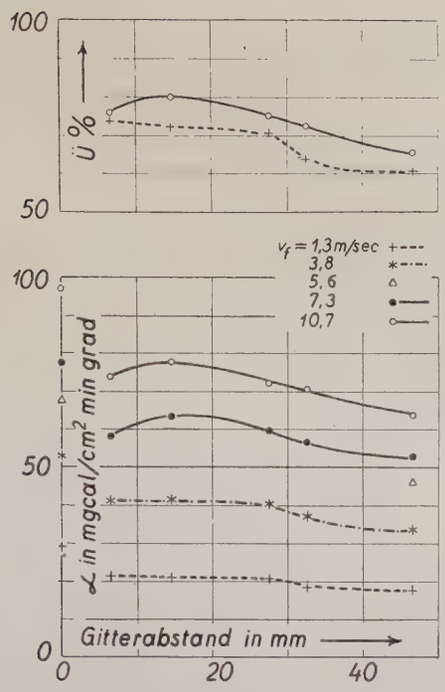

Abb. 8. Absolute und relative Wärmeübergangszahl hinter kugelförmigen Gittern als Funktion des Gitterabstandes.

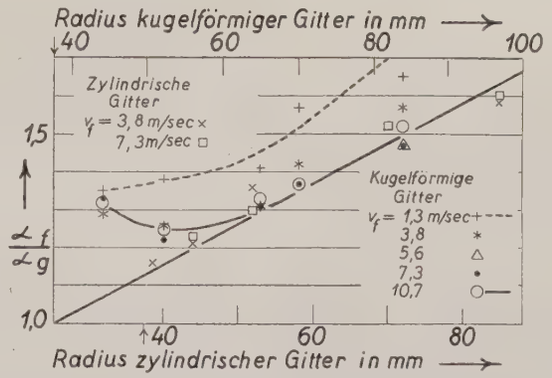

Abb. 9. α_f/α_g für engmaschige, kugelförmige und zylindrische Gitter als Funktion des Gitterradius (= Gitterabstand + 37.5 mm).

nur geringe Schutzwirkung festgestellt werden konnte, wurden die ausführlicheren Untersuchungen mit dem engmaschigen Gitter (Beschreibung Seite 5 und 12) durchgeführt. Die in dieser Meßreihe verwendeten Gitter sind alle aus dem gleichen Eisengewebe hergestellt und haben nur verschiedene Abstände von der Kugeloberfläche.

In Abbildung 8 sind im unteren Teil die Wärmeübergangszahlen hinter Gittern in Abhängigkeit vom Gitterabstand aufgetragen; auf der α-Achse, d. h. für den Gitterabstand Null, sind die bei freiem Frigorimeter gefundenen Werte angemerkt. Abbildung 8 zeigt bei den Windgeschwindigkeiten v_f = 1.3 und 3.8 m/sec abnehmende Wärmeübergangszahl, also zunehmende Schutzwirkung, mit zunehmendem Abstand des Gitters von der Frigorimeteroberfläche. Bei den Windgeschwindigkeiten v_f = 7.3 und 10.7 m/sec ist nur das kleinste Gitter mit 6.5 mm Abstand von der allgemeinen Gesetzmäßigkeit ausgenommen.

Im oberen Teil der Abb. 8 sind die relativen Wärmeübergangszahlen aufgetragen. Im Kapitel IV Seite 12 wurde festgestellt, daß die relative Wärmeübergangszahl für $4 < v_f < 11$ m/sec von der Windgeschwindigkeit unabhängig ist; dementsprechend können in Abbildung 8 die bei 7.3 und 10.7 m/sec gefundenen Werte der relativen Wärmeübergangszahl als auf einer einzigen Kurve liegend betrachtet werden.

Eine deutlichere Gesetzmäßigkeit ist zu erkennen, wenn man den Quotienten $\left(\frac{\alpha_f}{\alpha_g} = \frac{100}{Ü}\right)$ der Wärmeübergangszahlen bei freier und geschützter Kugel betrachtet. Aus Abbildung 9 ist, wenn man nur die für kugelförmige Gitter geltende obere Skala berücksichtigt, zweierlei zu ersehen:

1. Betrachtet man die Meßpunkte für höhere Windgeschwindigkeiten (v_f = 5.6, 7.3 und 10.7 m/sec) und für größere Gitterabstände (Gitterradien r_2 = 65, 70 und 84 mm) so zeigt sich, daß man durch diese Punkte eine Gerade legen kann. Die Verlängerung dieser Geraden gibt für den Gitterradius r_2 = 37.5 mm (d. h. für den Gitterabstand Null) den Wert $\frac{\alpha_f}{\alpha_g} = 1$ an (der Radius der Frigorimeterkugel = 37.5 mm ist auf Abbildung 9 oben links durch einen Pfeil angemerkt).

Mit anderen Worten: für höhere Windgeschwindigkeiten und größere Abstände nimmt der Quotient $\frac{\alpha_f}{\alpha_g}$ annähernd linear mit dem Abstand bzw. Gitterradius zu. Extrapoliert man diese Beziehung, so würde beim Gitterabstand Null die gleiche Wärmemenge durch Leitung und Konvektion abgegeben wie bei freier Kugel.

2. Bei kleineren Gitterabständen gemessene Werte (Gitterradien 52 und 44 mm) liegen oberhalb der vorhin betrachteten Geraden; für kleinere Gitterabstände nimmt die Schutzwirkung, wie auch Abbildung 8 zeigt, mit Annäherung des Gitters an den Körper zu. Es scheint sich also dem ersten, für größere Abstände geltenden Gesetz ein zweites zu überlagern.

Abb. 9 zeigt in der gestrichelten Kurve, die ebenso wie die ausgezogene nach oben konkav ist, die größere Schutzwirkung bei 1.3 m/sec. Nur das kleinste Gitter mit 6.5 mm Abstand hat bei allen Windgeschwindigkeiten annähernd gleiche Schutzwirkung.

Für Windgeschwindigkeiten $4 < v_f < 11$ m/sec und Gitterradien $60 < r_2 < 85$ mm ist, wie man Abbildung 9 entnehmen kann, in erster Näherung

$$\ddot{U} = \frac{\alpha_g}{\alpha_f} 100 = \frac{100}{1 + 0.011\,(r_2 - 37.5)} = \frac{100}{1 + 0.011\,a},$$

wobei der Gitterabstand a gleich ist der Differenz von Gitter- und Kugelradius $a = r_2 - 37.5$.

Für die Abhängigkeit der effektiven Windgeschwindigkeit (Seite 13) vom Gitterradius gilt eine ähnliche Näherungsformel, die ebenfalls für $4 < v_f < 11$ m/sec und $60 < r_2 < 85$ mm, also $22 < a < 48$ mm Geltung hat; es ist

$$v_g = \frac{v_f}{1 + 0.022\,a}.$$

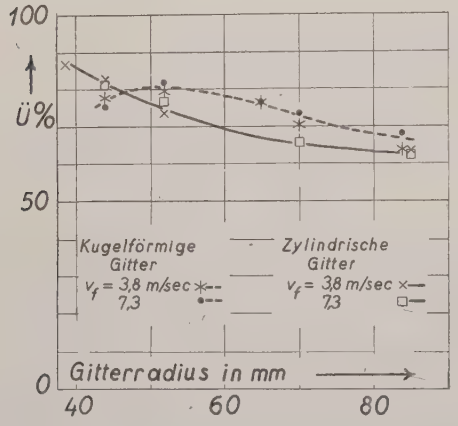

Abb. 10. Relative Wärmeübergangszahl hinter kugelförmigen und zylindrischen Gittern als Funktion des Gitterradius.

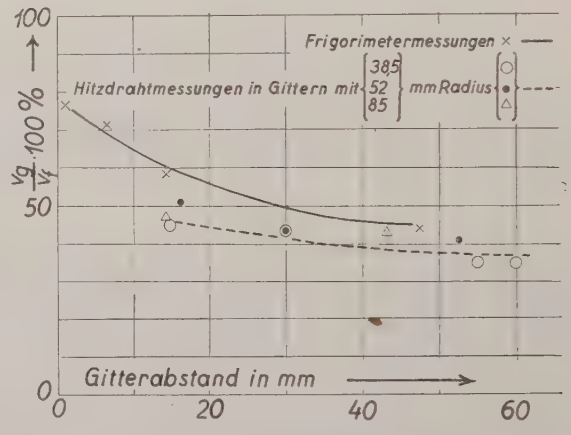

Abb. 11. Wahre und effektive Windgeschwindigkeit im Inneren zylindrischer Gitter.

b) Zylindrische Gitter.

Vor der Besprechung der Gründe, welche für die Abhängigkeit der Schutzwirkung vom Gitterabstand in Betracht kommen, soll festgestellt werden, ob und wieweit die Schutzwirkung von der Gitterform abhängt. Aus Abbildung 10 sieht man, daß bei zylindrischen Gittern für alle Gitterradien (von 38.5 bis 85 mm) die Schutzwirkung mit wachsendem Radius zunimmt, d. h. die Wärmeübergangszahl abnimmt. Die Schutzwirkung eines zylindrischen Gitters ist im allgemeinen größer als diejenige eines kugelförmigen mit gleichem Radius. Dies entspricht auch der Tatsache, daß bei gleichen Radien von zylindrischen und kugelförmigen Gittern nur diejenigen Punkte des Frigorimeters gleichen Abstand vom Gitter haben, die auf dem größten horizontalen Kreis liegen; alle übrigen Punkte haben hinter zylindrischen Gittern größere Abstände, also im allgemeinen kleinere Wärmeübergangszahl.

Trägt man für zylindrische wie für kugelförmige Gitter den Quotienten α_f/α_g in Abhängigkeit vom Gitterradius auf, so sieht man, daß hinter einem zylindrischen Gitter mit dem Radius r_2 das Frigorimeter im allgemeinen dieselbe Wärmeabgabe hat, wie hinter einem kugelförmigen Gitter mit einem um 12 mm größeren Radius. Man kann also die Darstellung für kugel- und zylinderförmige Gitter in Übereinstimmung bringen, wenn man eine der beiden Kurven parallel verschiebt. In Abbildung 9 sind dementsprechend – um 12 mm gegeneinander verschoben – auf der oberen Skala die Radien kugelförmiger Gitter, auf der unteren Skala die Radien zylindrischer Gitter aufgetragen. Betrachtet man in Abbildung 9 die für zylindrische Gitter gefundenen Punkte, so sieht man, daß sie wenig von der bei Untersuchung kugelförmiger Gitter betrachteten Geraden abweichen.

Für zylindrische Gitter ist annähernd:

$$\ddot{U} = \frac{\alpha_g}{\alpha_f} 100 = \frac{100}{1 + 0.011\,(r_2 - 25.5)} \text{ und } v_g = \frac{v_f}{1 + 0.022\,(r_2 - 25.5)}.$$

Während aber bei Zylindern die eben aufgestellten Formeln auch für kleinste Radien gelten, haben kugelförmige Gitter mit Radien unter 60 mm, d. h. mit Abständen unter ca. 20 mm, eine größere Schutzwirkung als es dem allgemeinen Gesetz entsprechen würde (Abbildung 9). Deshalb gilt die vorhin aufgestellte Regel, daß zylindrische Gitter eine größere Schutzwirkung haben als kugelförmige mit gleichem Radius, für die kleinsten Gitter mit weniger als 47 mm Radius nicht mehr (Abbildung 10).

c) Versuch einer Erklärung der Vorgänge.

Wie in den beiden letzten Abschnitten festgestellt wurde, nimmt die Wärmeübergangszahl — und infolgedessen auch die effektive Windgeschwindigkeit — mit wachsendem Gitterabstand im allgemeinen ab. Es liegt nun nahe, zu untersuchen, ob im leeren Gitter eine Abnahme der wahren Windgeschwindigkeit mit Vergrößerung des Gitterabstandes festgestellt werden kann. In leeren zylindrischen Gittern mit den Durchmessern 77, 104 und 170 mm wurde jeweils in einem horizontalen Querschnitt die Windgeschwindigkeit gemessen. Die Meßpunkte haben von den beiden Grundflächen des Zylinders je 20 cm Abstand. Ohne Gitter betrug die Windgeschwindigkeit 4 m/sec. Als Meßgerät diente der Seite 8 beschriebene Hitzdrahtwindmesser.

Ergebnis der Messungen:

In Punkten, die auf einer Senkrechten zur ungestörten Windrichtung liegen, herrscht im Inneren des Gitters gleiche Windgeschwindigkeit. Nur seitlich, im Abstand von weniger als 5 mm vom Gitter, wurden kleinere Windgeschwindigkeiten gemessen. In Richtung des ungestörten Windes nimmt die Windgeschwindigkeit ab; diese ist in allen drei Gittern gleich. In Abbildung 11 sind die mit Hitzdrahtanemometer gemessenen Windgeschwindigkeiten (in Prozenten der Windgeschwindigkeiten ohne Gitter) aufgetragen. Gleichzeitig sind in Abbildung 11 auch die effektiven Windgeschwindigkeiten (in Prozenten) aufgetragen, die sich aus den Frigorimetermessungen ergeben; als Gitterabstand ist hierbei die Differenz von Gitter- und Frigorimeterradius bezeichnet.

Um eine Erklärung dieser Geschwindigkeitsabnahme zu finden, wurde der Versuch unternommen, die Strömung sichtbar zu machen. Zu diesem Zweck wurde quer durch den Windstrahl ein dünner Faden gespannt und an diesem 2 bis 10 cm lange Fäden befestigt, deren Enden durch kleine Wattekugeln sichtbar gemacht wurden. Die Fäden wurden von oben photographiert. An Stellen, an denen die Luftströmung stationär verlief, wurden die Fäden vom Wind in waagrechter Lage gehalten und so wenig bewegt, daß sogar bei 10 sec Belichtungsdauer, die Wattekugeln verhältnismäßig scharf auf das Bild kamen. An Stellen starker Turbulenz zeigte das Bild deutlich die Bewegung der Fäden.

Im vollkommen leeren Windfeld herrschte parallele Strömung; nur an den Rändern des Windstrahles, d. h. in 30 cm Entfernung von der Kanalachse, machte sich starke Turbulenz bemerkbar.

Im Lee der ungeschützten Frigorimeterkugel (Abbildung 12 a) zeigte sich starke Turbulenz; seitlich war die Umströmung sichtbar; im übrigen wurde das Windfeld wenig gestört.

Die Strömung an einem kugelförmigen Eisengitter, in dem sich die Frigorimeterkugel befand, ist in Abbildung 12 b dargestellt. Im Lee des Gitters konnte keine Turbulenz festgestellt werden. In der Mitte der Leeseite war die Schutzwirkung so groß, daß die Fäden herabhingen. Die Luft trat divergent aus dem Gitter heraus.

Im Inneren des leeren zylindrischen Gitters mit 170 mm Durchmesser zeigte sich (Abbildung 12 c) divergente Strömung; die Fäden I und V schlossen einen Winkel von über 10^0 ein.

Die allgemeine Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmendem Gitterabstand läßt sich also damit erklären, daß die Stromlinien im Inneren des Gitters divergieren.

Anders verhält es sich bei Gittern mit kleinem Abstand von der Frigorimeterfläche. Die verschiedenen Schutzwirkungen von zylindrischen und kugelförmigen Gittern (Abbildung 9 und 10) bei kleinen Gitterradien haben ihre Ursache darin, daß in zylindrischen Gittern auch bei den kleinen Radien oben und unten sich eine Strömung zwischen Kugel und Gitter ausbilden kann, da über und unter der Kugel noch genügend Raum vorhanden ist. Bei kugelförmigen Gittern wird dagegen infolge der Reibung die Strömung in dem engen Zwischenraum stark vermindert.

VII. Wärmeschutzwirkung von Pflanzen.

Um den von Pflanzen gebotenen Schutz gegen Abkühlung zu untersuchen, wurde die Frigorimeterkugel mit Pflanzen umgeben im Windstrahl aufgestellt. Die Zweige bzw. Ranken waren an einem kugel-

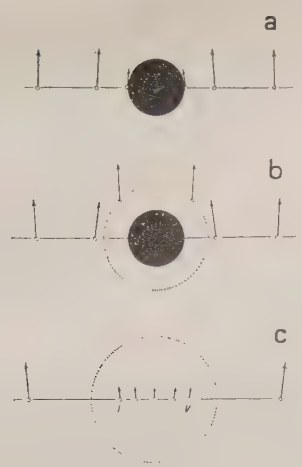

Abb. 12. Stromlinie.
a) an der ungeschützten Frigorimeterkugel,
b) am kugelförmigen Eisengitter, in dem sich die Frigorimeterkugel befindet,
c) innerhalb u. außerhalb eines leeren zylindrischen Gitters.

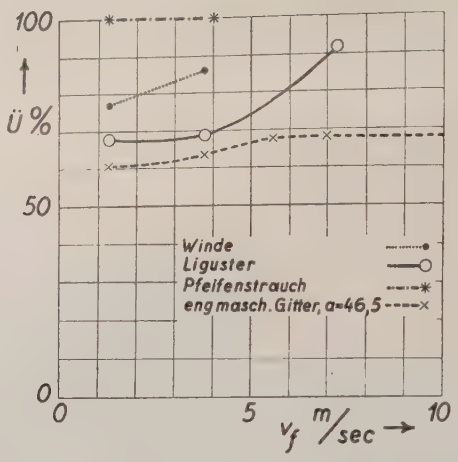

Abb. 13. Relative Wärmeübergangszahl hinter kugelförmig angeordneten Zweigen als Funktion d. Windgeschwindigkeit.

förmigen Drahtgestell aus 0.5 mm starkem Eisendraht befestigt; die Seitenlänge der einzelnen Maschen des Gestells betrug 40 mm, der Durchmesser 160 mm. Wie aus Messungen bei $v_f = 1.3$ m/sec hervorgeht, übt das Gestell allein keine Wirkung auf die Wärmeabgabe der Kugel aus. Es wurden bei drei verschiedenen Anordnungen Versuche ausgeführt.

1. Winden (ipomea purpurea) waren in einem Kasten gezogen. Die Pflanzenteile hatten 40 bis 70 mm Abstand von der Kugeloberfläche [Abbildung 15[1])].

2. Die 38 bis 112 mm von der Kugeloberfläche entfernten Blätter des Pfeifenstrauches (philadelphus coronarius) wurden unter dem Einfluß des Windes sehr rasch welk und rollten sich zusammen (Abbildung 16).

3. Abgeschnittene Zweige des Liguster (ligustrum vulgare) waren kugelförmig aufgebunden. Sie hatten 12 bis 162 mm Abstand von der Frigorimeteroberfläche (Abbildung 17).

Der Strahlungsschutz, den die Pflanzen bieten, wurde nicht bestimmt. Bei der Berechnung der Wärmeübergangszahl hinter Pflanzen wurde die effektive Ausstrahlung eingesetzt, die eine freie Kugel unter sonst gleichen Umständen haben würde. Die Größenordnung des dadurch entstehenden Fehlers kann man aus den Berechnungen bei engmaschigen Gittern ersehen (Anhang Seite 23).

Die unter Vernachlässigung des Strahlungsschutzes errechneten Werte der relativen Wärmeübergangszahl hinter Pflanzen zeigt Abbildung 13.

Vergleichen wir die Wirkung der Ligusterzweige mit derjenigen des größten engmaschigen Gitters, so sehen wir einen grundlegenden Unterschied. Bis zu 4 m/sec haben beide Kurven annähernd den gleichen Verlauf. Die relative Wärmeübergangszahl Ü ist hier hinter Zweigen nur um 6 bis 7% höher als hinter dem Metallgitter. Während aber bei ansteigender Windgeschwindigkeit sich Ü hinter Gittern oberhalb von 4 m/sec fast gar nicht ändert, üben die Zweige bei 7.4 m/sec nur eine ganz geringe Schutzwirkung aus. Die Wärmeabgabe beträgt hier über 90% derjenigen der ungeschützten Kugel. Bei der Winde ist schon ein großer Unterschied der Schutzwirkung bei 1.3 und 3.8 m/sec zu sehen. Die Zweige des Pfeifenstrauches, die nicht so dicht aufgebunden waren wie die des Liguster, übten keinen merklichen Schutz aus.

Der Unterschied zwischen Metallgittern und Pflanzen beruht darauf, daß das Gitter starr ist und auch bei höheren Windgeschwindigkeiten seine Form nicht ändert; die Blätter hingegen werden bei stärkerem Wind bewegt und abgebogen. Bei den großen, weichen Blättern der Winde genügt ein schwächerer Wind; sie werden bei 3.8 m/sec stark bewegt, während die schmalen festen Blätter des Liguster nicht so leicht nachgeben.

Hier sei noch bemerkt, daß diese Wirkung für künstlich in eine bestimmte Lage gebrachten Zweige gilt. Im Inneren eines Gesträuches oder eines Waldes kann eine ganz andere Schutzwirkung der Zweige beobachtet werden, da die in ihrer natürlichen Lage befindlichen Zweige sich dem Wind gegenüber anders verhalten. Woelfle[2]) fand bei Windmessungen in Bodennähe in der Bestandsmantelzone eines Fichtenwaldes starke Zunahme der Schutzwirkung bei zunehmender Windgeschwindigkeit außerhalb des Waldes. Er erklärt diese Erscheinung mit

[1]) Die Abbildungen 15–17 sind am Schluß auf einer Tafel gegeben.

[2]) Forstwiss. Zentralblatt 58, Heft 13, 1936.

folgenden Worten: „Stärkerer Wind bringt Äste und Zweige aus ihrer fast genau waagrechten Lage, preßt sie aufeinander und bildet so einen wesentlich besseren Windschutz (Jalousiewirkung) als ihn die Äste und Zweige in ihrer normalen Stellung gewähren."

VIII. Schlußfolgerungen.

Zum Schlusse soll darauf hingewiesen werden, daß bei allen hier beschriebenen Versuchen der Abkühlungskörper von allen Seiten vom Gitter umgeben war. Hinter Zäunen und Hecken sind die Verhältnisse anders, da dort ein Umströmen möglich ist. Es wurde im Windkanal noch eine Meßreihe mit ebenem Gitter durchgeführt, auf die hier nur kurz eingegangen werden soll. Im Luv wurde abnehmende Windgeschwindigkeit mit Annäherung an das Gitter gemessen; hinter dem Gitter nahm die Geschwindigkeit zunächst weiter ab; erst in einiger Entfernung nahm sie infolge Umströmens des Gitters wieder zu.

Vorliegende Arbeit kann vielleicht für die Untersuchung von Stoffen eine Anregung geben.

Über den Wärmeschutz von Kleiderstoffen wurde schon viel gearbeitet (Literaturverzeichnis 12 bis 19). Es fanden dabei ähnliche Versuchsanordnungen Verwendung wie in vorliegender Arbeit: Ein warmer Körper wurde mit dem zu untersuchenden Stoff umhüllt und die Wärmeabgabe des Körpers in der Zeiteinheit bestimmt. Da bei Stoffen die Verhältnisse bedeutend unübersichtlicher sind als bei den Versuchen mit Metallgittern, wurden nicht die Anteile der Wärmeabgabe durch Strahlung und durch Leitung und Konvektion berechnet, sondern die gesamte Wärmeabgabe bestimmt.

Die früheren Messungen[1]) wurden mit anliegenden Stoffen ausgeführt. Marsh[2]) fand eine um so geringere Schutzwirkung des Gewebes, je fester dasselbe aufsitzt, da der aufliegende Stoff von den herausragenden Fasern getragen wird und die Schutzwirkung von der Lufthaut zwischen Stoff und Körper abhängt. Marsh schloß daraus, daß Versuche mit anliegenden Stoffen als vergleichende Messungen ungeeignet sind. Er legte die Stoffe auf ein Gestell aus weitmaschigem Drahtgitter; hier übte eine geringe Dehnung des Stoffes auf die Schutzwirkung keinen Einfluß aus. Deshalb wurde bei seinen vergleichenden Messungen immer ein Abstand von 5 mm zwischen Stoff und Zylinderoberfläche hergestellt.

Mönch[3]) untersuchte den Wärmeschutz von anliegenden und abstehenden Stoffen. Ordnet man die Stoffe nach ihrer Schutzwirkung, so ergibt sich aus seinen Messungen bei Wind eine vollkommen andere Reihenfolge, je nachdem, ob der Stoff anliegt oder absteht. Mönch hebt hervor, daß bei anliegendem Stoff die Wärmedurchlässigkeit, bei abstehendem die Luftdurchlässigkeit von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Vorliegende Arbeit weist darauf hin, daß nicht nur das Vorhandensein eines Abstandes, sondern auch die Größe des Abstandes von Bedeutung ist. Betrug doch die relative Wärmeübergangszahl 68 bis 81% je nach dem Abstand des Gitters vom Körper (Abbildung 8).

Zusammenfassung.

Es wird der Mechanismus des Wärmeschutzes betrachtet und eine Formel angegeben, an Hand derer der Strahlungsschutz, den ein Gitter bietet, abgeschätzt werden kann.

Die Änderung des Konvektionsanteils der Wärmeabgabe bei Umschließen der Frigorimeterkugel mit einem Gitter wurde experimentell untersucht.

Hinter den einzelnen Gittern beträgt die Wärmeübergangszahl der Kugel bei Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 11 m/sec einen bestimmten, von der Windgeschwindigkeit unabhängigen Prozentsatz der Wärmeübergangszahl der ungeschützten Kugel; bei kleineren Windgeschwindigkeiten ist die Schutzwirkung größer.

Weitmaschige Gitter geben in Bezug auf die Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion nur geringen Schutz; für die gesamte Wärmeabgabe ist jedoch bei Windstille oder geringer Luftbewegung der Strahlungsschutz von Bedeutung.

Bei zunehmendem Abstand nimmt die Schutzwirkung kugelförmiger und zylindrischer Gitter zu. Eine Ausnahme bilden kugelförmige Gitter, die weniger als rund 10 mm von der Frigorimeteroberfläche entfernt sind.

Pflanzen verändern bei höheren Windgeschwindigkeiten ihre Lage; ihre Schutzwirkung ist deshalb sehr stark von der Windgeschwindigkeit abhängig.

1) W. Bachmann, Archiv für Hygiene Bd. 103, Heft 4, 1930.
v. Vintschger, Archiv für Hygiene Bd. 101, Heft 5, 1929.
2) M. C. Marsh, Proc. Phys. Soc. 47, 1930.
3) E. Mönch, Melliand Textilberichte 1935, Nr. 1.

Vorliegende Arbeit wurde im Lehr- und Forschungsinstitut für Meteorologie an der Universität München ausgeführt. Allen Angehörigen dieses Institutes, sowie des meteorologischen Institutes der forstlichen Versuchsanstalt München, bin ich für ihr freundliches Entgegenkommen und für die Überlassung aller zu den Versuchen benötigten Instrumente zu großem Dank verpflichtet. Besonderen Dank schulde ich Herrn Geheimen Regierungsrat Professor Dr. A. Schmauß und Herrn Professor Dr. R. Geiger für die Anregung zu dieser Arbeit und für das Interesse, das sie ihr stets entgegenbrachten. Herrn Dr. habil. Findeisen verdanke ich die Anregung zu den Abkühlungsmessungen im Inneren von zylindrischen Gittern und zu den Messungen mit dem Hitzdrahtanemometer.

Anhang.

a) Berechnung der effektiven Ausstrahlung eines vom Gitter umgebenen Körpers.

Eine konvexe geschlossene Fläche F_1 (Abbildung 1) sei umgeben von einer gleichfalls konvexen Fläche F_2 und diese von einer geschlossenen Fläche F_3. Von F_2 sei ein Teil, nämlich nF_2, für Strahlung vollkommen undurchlässig und habe außen und innen dasselbe Absorptionsvermögen; der übrige Teil, also $(1-n)\,F_2$, lasse die ganze auffallende Strahlung hindurch. T_1, T_2, T_3 seien die absoluten Temperaturen, ε_1, ε_2, ε_3 die Absorptionszahlen der Flächen, σ die Stefan-Boltzmannsche Konstante. Die undurchlässigen Teile sollen gleichmäßig auf der Fläche F_2 verteilt sein; d. h. von der Energie E_1, die F_1 ausstrahlt, soll nE_1 auf den undurchlässigen Teil von F_2 fallen.

Unter obigen Voraussetzungen soll die effektive Ausstrahlung von F_1 bestimmt werden.

F_1 strahlt $F_1 E_1 = F_1 \sigma \varepsilon_1 T_1^4$ cal in der Minute aus. Diese Energie verteilt sich auf F_2 und F_3.

Auf den undurchlässigen Teil von F_2 fällt $F_1 E_1 n$, auf F_3 $F_1 E_1 (1-n)$.

F_2 reflektiert $F_1 E_1 n (1-\varepsilon_2)$, F_3 reflektiert $F_1 E_1 (1-n)(1-\varepsilon_3)$.

F_2 sendet nach außen und innen je die Strahlung $F_2 n E_2 = F_2 n \sigma \varepsilon_2 T_2^4$ aus.

Die nach außen gerichtete Strahlung trifft vollständig auf F_3; von F_3 wird also $F_2 n E_2 (1-\varepsilon_3)$ reflektiert.

F_3 strahlt die Energie $F_3 E_3 = F_3 \sigma \varepsilon_3 T_3^4$ aus.

Fassen wir die bisher betrachtete emittierte und reflektierte Strahlung zusammen, so beträgt die von der Innenfläche von F_2 ausgehende Energie $F_1 E_1 n (1-\varepsilon_2) + F_2 E_2 n$, die von F_3 ausgehende Energie $F_1 E_1 (1-n)(1-\varepsilon_3) + F_2 n E_2 (1-\varepsilon_3) + F_3 E_3$.

Wir wollen nun mit G den Teil einer von der Innenseite von F_2, mit H den Teil einer von F_3 ausgehenden Strahlungseinheit bezeichnen, der nach mehrmaliger Reflektion auf F_1 trifft. G und H sind also Funktionen der geometrischen Verhältnisse und der Absorptionszahlen der drei Flächen.

Auf F_1 trifft dann im ganzen die Strahlung

$$G\,[F_1 E_1 n(1-\varepsilon_2) + F_2 n E_2] + H\,[F_1 E_1 (1-n)(1-\varepsilon_3) + F_2 n E_2 (1-\varepsilon_3) + F_3 E_3].$$

Die effektive Ausstrahlung von F_1 beträgt also

$$F_1 S_g = F_1 E_1 - \varepsilon_1 G\,[F_1 E_1 n(1-\varepsilon_2) + F_2 n E_2] - \varepsilon_1 H\,[F_1 E_1 (1-n)(1-\varepsilon_3) + F_2 n E_2 (1-\varepsilon_3) + F_3 E_3]. \quad (1)$$

Haben alle drei Flächen die gleiche Temperatur $T_1 = T_2 = T_3 = T$, so hat F_1 die effektive Ausstrahlung $F_1 S_g = 0$. Setzt man diese Bedingung in Gleichung (1) ein, so erhält man nach Division durch $F_1 E_1 = F_1 \sigma \varepsilon_1 T^4$:

$$0 = 1 - Gn\frac{F_2}{F_1}\left[\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1 (1-\varepsilon_2) + \varepsilon_2\right] - H\frac{F_3}{F_1}\left[\frac{F_1}{F_3}\varepsilon_1 (1-n)(1-\varepsilon_3) + \frac{F_2}{F_3} n \varepsilon_2 (1-\varepsilon_3) + \varepsilon_3\right]. \quad (2)$$

Zur Vereinfachung soll angenommen werden, daß die Fläche F_3 sehr groß im Vergleich zu F_1 und F_2 sei; dann ist $\frac{F_1}{F_3} \ll 1$ und $\frac{F_2}{F_3} \ll 1$ und man erhält aus Gleichung (2)

$$0 = 1 - Gn\frac{F_2}{F_1}\left[\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1 (1-\varepsilon_2) + \varepsilon_2\right] - H\frac{F_3}{F_1}\varepsilon_3. \quad (3)$$

Um die unbekannten Funktionen G (F_1, F_2, F_3, ε_1, ε_2, ε_3, n) und H (F_1, F_2, F_3, ε_1, ε_2, ε_3, n) zu berechnen, ist noch eine Gleichung notwendig.

Zur Berechnung von G soll nun der Weg verfolgt werden, den eine von der Innenseite F_2 ausgehende Energieeinheit zurücklegt (Abbildung 14).

Von dieser Energieeinheit trifft direkt auf F_1 ein gewisser Teil $I = c$, der nur von der Form und der Größe der Flächen F_1 und F_2 abhängen kann.

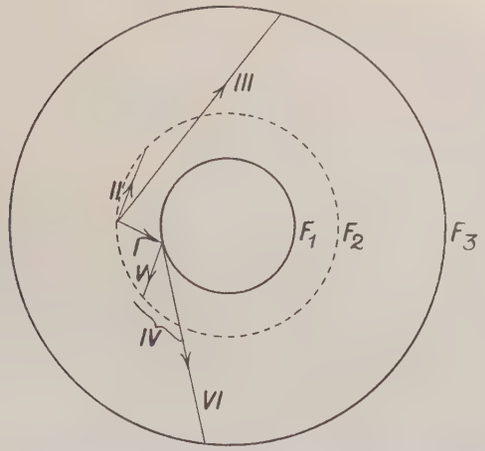

Abb. 14. Verlauf der Strahlung zwischen Gitter und innerer Fläche.

Dann wird $\varepsilon_1 c$ absorbiert; der Rest $(1-\varepsilon_1 c)$ verteilt sich auf F_2 und F_3.
F_2 erhält $VII = II + V = n\,(1-\varepsilon_1 c)$,
F_3 erhält $VIII = III + VI = (1-n)\,(1-\varepsilon_1 c)$.
$VIII \cdot (1-\varepsilon_3)$ wird an F_3 reflektiert; nach Definition von H trifft hiervon auf F_1
$IX = H\,(1-n)\,(1-c\,\varepsilon_1)\,(1-\varepsilon_3)$.

Von VII wird $e = n\,(1-\varepsilon_1 c)\,(1-\varepsilon_2)$ an F_2 reflektiert und durchläuft denselben Weg, wie vorhin die Energieeinheit. Verfolgt man diesen Weg weiter, so erhält man die insgesamt auf F_1 fallende Energie

$$G = \sum_{i=0}^{\infty} c\,e^i + \sum_{i=0}^{\infty} H\,(1-n)\,(1-\varepsilon_1 c)\,(1-\varepsilon_3)\,e^i = \frac{c}{1-e} + \frac{H\,(1-n)\,(1-\varepsilon_1 c)\,(1-\varepsilon_3)}{1-e}$$

$$G = \frac{c + H\,(1-n)\,(1-\varepsilon_1 c)\,(1-\varepsilon_3)}{1-n\,(1-\varepsilon_1 c)\,(1-\varepsilon_2)}. \tag{4}$$

c ist von n unabhängig; man kann deshalb c berechnen, indem man $n = 1$ setzt. Dies bedeutet, daß F_2 vollkommen undurchlässig ist, also keine Strahlung von F_3 auf F_1 gelangen kann; d. h. $H = 0$.

Man setzt diese Werte in die Gleichungen (2) und (4) ein und erhält:

$$c = \frac{F_1}{F_2}. \tag{5}$$

Setzt man (4) und (5) in Gleichung (3) ein, so erhält man, wenn man wiederum F_3 sehr groß gegenüber den beiden anderen Flächen annimmt:

$$\frac{1-n}{\varepsilon_3\left[1-n\left(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right)(1-\varepsilon_2)\right]} \cdot \frac{F_1}{F_3} = H. \tag{6}$$

Es ist also, wenn $F_1/F_3 \ll 1$ auch $H \ll 1$ und

$$G = \frac{F_1/F_2}{1-n\left(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right)(1-\varepsilon_2)}. \tag{7}$$

Setzt man G und H in Gleichung (1) ein, so erhält man bei Vernachlässigung von F_1/F_3 und F_2/F_3 nach einigen Umformungen die von $1\,cm^2$ der Fläche F_1 effektiv ausgestrahlte Energie

$$S_g = \sigma\varepsilon_1 \frac{(T_1^4 - T_2^4)\,n\varepsilon_2 + (T_1^4 - T_3^4)\,(1-n)}{1-n\left(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right)(1-\varepsilon_2)}. \tag{1a}$$

Führt man obige Rechnung aus, ohne die vereinfachende Annahme zu machen, daß die äußerste Fläche F_3 sehr groß ist, so erhält man die effektive Ausstrahlung der Flächeneinheit von F_1:

$$S_g = E_1 - \varepsilon_1 G n\left[E_1\,(1-\varepsilon_2) + \frac{F_2}{F_1}E_2\right] - \varepsilon_1 H\left[E_1\,(1-n)\,(1-\varepsilon_3) + \frac{F_2}{F_1}n\,E_2\,(1-\varepsilon_3) + \frac{F_3}{F_1}E_3\right].$$

wobei

$$E_1 = \sigma\varepsilon_1 T_1^4,$$
$$E_2 = \sigma\varepsilon_2 T_2^4,$$
$$E_3 = \sigma\varepsilon_3 T_3^4.$$

Aus den Gleichungen (2), (4) und (5) erhält man

$$H = \frac{\frac{F_1}{F_2} \cdot (1-n)}{\frac{F_1}{F_3} \cdot \varepsilon_1 (1-\varepsilon_3)(1-n) + \frac{F_2}{F_3} n \varepsilon_2 (1-\varepsilon_3)\left[(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1)(1-2n+n\varepsilon_2)+1\right] + \varepsilon_3\left[1-n(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\right]}$$

$$G = \frac{\frac{F_1}{F_2} + H(1-n)(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1)(1-\varepsilon_3)}{1-n(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)}.$$

Spezialfälle.

1. Ist der Abkühlungskörper (F_1) statt mit einem Gitter mit einer geschlossenen Fläche F_2 umgeben, so erhält man die effektive Ausstrahlung des Körpers durch Einsetzen von $n = 1$ in Gleichung (1 a).

Es ist dann

$$S_g = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{T_1^4 - T_2^4}{\varepsilon_2 + \frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1 (1-\varepsilon_2)}. \tag{8}$$

Letztere Formel wurde schon von Christiansen[1]) und später von Nußelt[2]) abgeleitet.

2. Ist der Abkühlungskörper ohne Schutz in einem großen Raume aufgestellt, so erhält man die effektive Ausstrahlung durch Einsetzen von $n = 0$ in Gleichung (1 a):

$$S_f = \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_3^4). \tag{1b}$$

Dasselbe erhält man auch aus Gleichung (8), wenn man die Fläche F_2 sehr groß werden läßt. In Gleichung (8) bezieht sich der Index 2, in Gleichung (1 b) der Index 3 auf die äußere Fläche.

Ausstrahlung im Freien.

Alles bisher Besprochene gilt für einen geschlossenen Raum, in dem außer den betrachteten Flächen keine Strahler vorhanden sind.

Die effektive Ausstrahlung eines im Freien befindlichen und von einem Gitter umgebenen Körpers kann unter Vernachlässigung der Reflexstrahlung, die von der Umgebung auf den Körper fällt, durch eine ähnliche Rechnung ermittelt werden.

Die auf ein Quadratzentimeter der ungeschützten Fläche F_1 fallende Strahlung sei J. Die effektive Ausstrahlung im Freien ist dann

$$S_g = \varepsilon_1 \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)\, n\, \varepsilon_2 + (\sigma T_1^4 - J)(1-n)}{1-n\left(1-\frac{F_1}{F_2}\varepsilon_1\right)(1-\varepsilon_2)}. \tag{9}$$

Formel (9) unterscheidet sich von (1 a) nur darin, daß σT_3^4 durch J ersetzt ist. Dies hat seinen Grund in der Annahme, daß die Fläche F_3 im Verhältnis zu den beiden anderen Flächen sehr groß ist; bei der Herleitung von (1 a) wurde also die Reflexion an F_3 vernachlässigt. Es fällt dann im geschlossenen Raum von der Wandtemperatur T_3 – wie Gleichung (1 b) zeigt – auf ein Quadratzentimeter die Strahlung σT_3^4; im Freien wurde die auf ein Quadratzentimeter fallende Strahlung mit J bezeichnet.

b) Bedeutung der Berücksichtigung des Strahlungsschutzes bei der Berechnung der Wärmeübergangszahl.

Bei der Berechnung der Wärmeübergangszahl hinter Drahtgittern wurde der Strahlungsschutz, den die Gitter bieten, berücksichtigt. Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, welchen Einfluß diese Berücksichtigung auf das Ergebnis der Rechnung hat.

[1]) Annalen d. Phys u. Chem. Bd. XIX, 1883.

[2]) Zeitschr. d. Ver. d. Ing. 1923, S. 692.

Tabelle 5. Absolute und relative Wärmeübergangszahl hinter einem engmaschigen kugelförmigen Gitter mit und ohne Berücksichtigung des Strahlungsschutzes (Gitterdurchmesser 168 mm).

	ohne Berücksichtigung des Strahlungsschutzes		mit Berücksichtigung des Strahlungsschutzes	
	α_g	Ü	α_g	Ü
Werte bei 1.3 m/sec . . .	16.7	58	17.6	61
Werte bei 3.8 m/sec . . .	33.0	62	33.7	63.5
Werte bei 7.3 m/sec . . .	51.6	67	52.6	68

In Wirklichkeit rührt die Verringerung der Wärmeabgabe hinter Gittern teils von der geringeren effektiven Ausstrahlung, teils von der geringeren Konvektion her. Läßt man den Strahlungsschutz unberücksichtigt, so wird die ganze Schutzwirkung der verringerten Konvektion zugeschrieben, also eine zu kleine Wärmeübergangszahl errechnet. Entsprechend dem geringeren prozentualen Strahlungsanteil bei größeren Windgeschwindigkeiten, nimmt der Fehler bei Berechnung der relativen Wärmeübergangszahl mit wachsender Windgeschwindigkeit ab.

Literaturverzeichnis.

Wärmeübergangszahl und Abkühlungsgröße.

1. K. Büttner, Die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion, Verdunstung und Strahlung in Bioklimatologie und Meteorologie. Veröff. d. Preuß. Met. Inst., Abh. Bd. X, Nr. 5, 1934.
2. Dorno u. Thilenius, Das Davoser Frigorimeter. Meteorol. Zeitschr. Jahrg. 42, 1925.
3. R. Faust, Das Abkühlungsklima im Wald und auf freiem Feld nach Frigorimeterregistrierungen. Veröffentl. des Geophys Inst. d. Univ. Leipzig, 2. Ser., Bd. 8, 1936.
4. E. Gold, Quart. Journ. R. Met. Soc. London 61, S. 316, 1935.
5. H. Lehmann, Mikroklimatische Untersuchungen der Abkühlungsgröße in einem Waldgebiet. Veröff. d. Geophys. Inst. d. Univ. Leipzig, Bd. 7, H. 4, 1936.
6. Mörikofer, Zur Klimatologie der Abkühlungsgröße. Acta Davosiana Jahrg. 1, Nr. 3, 1933.
7. H. Pfleiderer, Die Abkühlungsgröße, ihre heilklimatische Bedeutung und ihre Meßtechnik. Strahlentherapie Bd. 40, 1931, S. 562.

Strahlung.

8. C. Christiansen, Absolute Bestimmung des Emissions- und Absorptionsvermögens für Wärme. Annalen d. Phys. und Chemie Bd. XIX, 1883.
9. Knoblauch u. Henky, Anleitung zu genauen technischen Temperaturmessungen. München und Berlin 1926.
10. Nußelt, Der Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine. Zeitschr. d. Ver. d. Ing. 1923, S. 692.
11. E. Schmidt, Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur. Beihefte z. Gesundheitsing. R. 1, H. 20, 1927, Seite 1.

Wärmeschutz von Kleiderstoffen.

12. W. Bachmann, Über das Wärmehaltungsvermögen von Bekleidungsstoffen. Archiv für Hygiene Bd. 103, H. 4, 1930.
13. Burgers, Studien über die hygienische Bedeutung der Kleider. Archiv für Hygiene Bd. 103 H. 4, 1930.
14. Krüger, Über das Wärmehaltungsvermögen von Textilmaterialien. Klepzig's Textilzeitschr. 39. Jahrg., H. 42, 1936.
15. M. C. Marsh, The thermal insulating properties of fabrics. Proc. Phys. Soc. 47, 1930.
16. E. Mönch, Experimentelle Bestimmung des Wärmeschutzes von Kleiderstoffen. Melliand Textilberichte, Heidelberg 1935, Nr. 1.
17. Siegenthaler, Ein Beitrag zur Frage der abkühlenden Wirkung des Windes bei Bekleidung. Biokl. Beibl. Reihe 1, 1934, 25.
18. Siegenthaler, Zur Frage der abkühlenden Wirkung des Windes auf mehrfach bekleidete Körper. Biokl. Beibl. H. 2, 1936.
19. v. Vintschger, Das Wärmeisolierungsvermögen der Kleiderstoffe, gemessen mit Hilfe des Davoser Frigorimeters. Archiv für Hygiene Bd. 101, H. 5, 1929. — Auszug aus der Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 535, 1928.

Physikalische Nachschlagswerke.

20. E. v. Angerer, Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen. Braunschweig 1936.
21. Wien u. Harms, Handbuch der Experimentalphysik. Bd. 4. Aero- und Hydrodynamik. Leipzig 1931.
22. F. Kohlrausch, Praktische Physik. Leipzig und Berlin 1935.

Wirkung von Gittern.

23. W. Kreutz, Agrarmeteorologische Studien über Bestandsklima, über Windschutz und über Transpirationsverhältnisse im Gewächshaus. Reichsamt für Wetterdienst. Wiss. Abh. Bd. 2, Nr. 7, 1937.
24. I. M. Staag, Some effects produced by protective shields on the readings of grass minimum thermometers. Met. Off. profess. notes Nr. 43, vol. 43, London 1925.

Windmessungen im Walde.

25. M. Woelfle, Wald und Windschutz. Forstwissenschaftliches Centralblatt 58. Jahrg., H. 13, 1936.

Instrumentenkunde.

26. E. Kleinschmidt, Handbuch der meteorologischen Instrumente. Berlin 1935.

Abb. 15. Von Winden (ipomea purpurea) umgebene Kugel.

Abb. 16. Von Zweigen des Pfeifenstrauches (philadelphus coronarius) umgebene Kugel.

Abb. 17. Von Zweigen des Liguster (ligustrum vulgare) umgebene Kugel.

L e b e n s l a u f .

Am 22. März 1909 bin ich, Auguste B ü d e l , in Tiflis (Georgien) als Tochter des reichsdeutschen Kaufmanns Julius Büdel geboren. Ich besitze die deutsche Staatsangehörigkeit und wohne seit Juli 1914 ständig in München.

Mein Lebenslauf ist aus folgenden Daten ersichtlich:

1928: Reifeprüfung an der Luitpoldoberrealschule in München,

1928 bis 1932: Studium an der philosophischen Fakultät II.Sektion der Universität München,

1932/33: Prüfung für den Unterricht in der Mathematik und Physik,

1933/34: Praktizieren am städt.Mädchenlyzeum an der Luisenstraße in München,

3.XII.1934 bis 31.III.1935 und 5.X.1936 bis20.II.1937: Ausführung klimatologischer Arbeiten beim Luftamt München,

1935 bis 1937: Studium am meteorologischen Institut der Universetät München und Besuch meteorologischer Vorlesungen und Übungen,

1.I.1936 bis 3.X.1936 und März 1937: Ausführung klimatologischer Arbeiten bei Herrn Univ.Prof.Dr.R. Geiger.